ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

5.2020

ВІСНИК

Хмельницького національного університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2020, Issue 5, Volume 289

Хмельницький

ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки

Затверджений як фахове видання (перереєстрація)
Категорія «Б», РІШЕННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ № 1643 ВІД 28.12.2019

Засновано в липні 1997 р. ***Виходить 6 разів на рік***

Хмельницький, 2020, № 5(289)

Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)

Включено до науково-метричних баз:

Google Scholar	http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221

Головний редактор	**Скиба М. Є.**, д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Хмельницького національного університету
Заступник головного редактора	**Синюк О. М.**, д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	**Горященко С. Л.,** к.т.н., доцент кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., **Бойко Ю.М.,** д.т.н., **Говорущенко Т.О.,** д.т.н., **Гордєєв А.І.,** д.т.н., **Грабко В.В.,** д.т.н., **Диха О.В.,** д.т.н., **Защепкіна Н.М.,** д.т.н., **Захаркевич О.В.**, д.т.н., **Злотенко Б.М.**, д.т.н., **Зубков А.М.**, д.т.н., **Каплун П.В.**, д.т.н., **Карташов В.М.**, д.т.н., **Кичак В.М.**, д.т.н., **Мазур М.П.**, д.т.н., **Мандзюк І.А.**, д.т.н., **Мартинюк В.В.**, д.т.н., **Мельничук П.П.**, д.т.н., **Місяць В.П.**, д.т.н., **Мясіщев О.А.**, д.т.н., **Нелін Є.А.**, д.т.н., **Павлов С.В.**, д.т.н., **Параска О.А.,** к.т.н., **Рогатинський Р.М.**, д.т.н., **Горошко А.В.**, д.т.н., **Сарібекова Д.Г.**, д.т.н., **Семенко А.І.**, д.т.н., **Славінська А.Л.**, д.т.н., **Харжевський В.О.**, д.т.н., **Шинкарук О.М.**, д.т.н., **Шклярський В.І.**, д.т.н., **Щербань Ю.Ю.**, д.т.н., **Ясній П.В.**, д.т.н., професор, **Бубуліс Альгімантас**, доктор наук **(Литва)**, **Елсаєд Ахмед Ельнашар**, доктор наук **(Єгипет)**, **Кальчиньскі Томаш**, доктор наук **(Польща)**, **Коробко Євгенія Вікторівна**, д.т.н. **(Білорусія)**, **Лунтовський Андрій Олегович**, д.т.н. **(Німеччина)**, **Матушевський Мацей,** доктор наук **(Польща)**, **Мушлевський Лукаш,** доктор наук **(Польща)**, **Мушял Януш**, доктор наук **(Польща)**, **Натріашвілі Тамаз Мамієвич**, д.т.н., **(Грузія)**, **Попов Валентин,** доктор природничих наук **(Німеччина)**

Технічний редактор Горященко К. Л., к.т.н.
Редактор-коректор Броженко В. О.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 5 від 26.11.2020 р.

Адреса редакції: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

☎ (038-2) 67-51-08 **web:** http://journals.khnu.km.ua/vestnik
http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

e-mail: visnyk.khnu@gmail.com

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 9722 від 29 березня 2005 року

© Хмельницький національний університет, 2020
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2020

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

Н.М. ЗАЩЕПКІНА, В.І. АРТЕМЧУК
КОНТРОЛЬ ВИХОДУ МЕТАНУ У БІОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ 7

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, Т.Л. ГОНЧАРУК
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ 14

Ю.В. ФОРКУН, Д.А. МАКАРИШКІН, В.В. БЕРЕЗОВЧУК, А.М. ПАЛЕВСЬКИЙ
МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ КЕРУВАННЯ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ 21

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, А.В. ТКАЧУК
ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ КОГЕРЕНТНО-ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ДОППЛЕРІВСЬКИХ ЗМІЩЕНЬ ЧАСТОТИ 28

О.О. ПОЛЬНОВ, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, В.В. МІШАН
ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖ 35

І.С. ПЯТІН., Д.А. МАКАРИШКІН, О.В. ВОЄВОДКО
МОДЕЛЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ СИГНАЛУ У КАНАЛІ ПЕРЕДАЧІ 39

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

А.С. КАШТАЛЬЯН, Б.О. САВЕНКО, В.І. ГРИБИНЧУК
МОДЕЛІ ТА ТИПИ ПРИМАНОК ДЛЯ ЗЛОВМИСНИХ АТАК В КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ 45

В.В. МОСТОВИЙ, С.Л. ГОРЯЩЕНКО
СЕГМЕНТАЦІЯ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ 51

І.В. ФОРКУН, Д.М. МЕДЗАТИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, О. В. ЧЕРВОНЕЦЬКИЙ
СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА КАЛМАНА 57

С.Г. НАТРОШВІЛІ, Г.Р. НАТРОШВІЛІ, Т.Г. БАБІНА, Б.М. ЗЛОТЕНКО, Т.І. КУЛІК
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИРОДНИМ І ШТУЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ РОЗУМНОГО БУДИНКУ 65

І.С. БУРЛАЧЕНКО, В.Ю. САВІНОВ, О.Р. ТОГОЄВ
МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ЯК ХОСТІВ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ 72

Р. КАМІНСЬКИЙ, Н. ШАХОВСЬКА
МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ОПЕРАТОРА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В СТРЕСОВИХ СИТУАЦІЯХ 81

С.М. ЛИСЕНКО, Т.М. КИСІЛЬ, Р.В. ЩУКА
ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ТА ШПЗ В КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖАХ 89

В.Ц. МІХАЛЕВСЬКИЙ, Г.І. МІХАЛЕВСЬКА
АСПЕКТИ МІГРАЦІЇ ДАНИХ З ЛОКАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДО ГІБРИДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ 95

Г.І. РАДЕЛЬЧУК, М.Л. ХОРОШУН
КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ПЛАТІЖНОЇ СИСТЕМИ З ВЛАСНОЮ ЦИФРОВОЮ ВАЛЮТОЮ НА БАЗІ БЛОКЧЕЙН-ПЛАТФОРМИ ETHEREUM 106

О.М. ЯШИНА, О.А. КРАВЧУК
ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ, АРХІТЕКТУРНИЙ СТИЛЬ REST ТА ЇХ СУЧАСНА РЕАЛІЗАЦІЯ НА JAVA 111

Н.І. ПРАВОРСЬКА, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, С.К. ПІДЧЕНКО
РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ КРИПТОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В ПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ 120

М.П. КОМАР
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ВЕЛИКИХ ДАНИХ 125

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В.П. ЯСНІЙ
ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ АУСТЕНІТУ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ 131

М. С. СТЕЧИШИН, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО, М. В. ЛУКЯНЮК, А. В. МАРТИНЮК, Ю. М. БІЛИК
РОЗРОБКА КОНТРОЛЕРА МОЛОКА ВРАЖЕНОГО МАСТИТОМ 136

М.Г. ЗАЛЮБОВСЬКИЙ, В.В. МАЛИШЕВ, І.В. ПАНАСЮК
СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНО ВИЗНАЧЕНОГО ПРОСТОРОВОГО ШАРНІРНОГО МЕХАНІЗМУ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ 142

С.О. КОШЕЛЬ, Г. В. КОШЕЛЬ
КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ ТРЕТЬОГО КЛАСУ З СКЛАДНИМИ ЛАНКАМИ 149

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, А.П. ЛИПИН, С.А. РОМАШКЕВИЧ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУППЫ АССУРА ЧЕТВЕРТОГО КЛАССА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ДВУМЯ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ 154

О.А. ДОРОФЄЄВ, О.В. БАГРІЙ, В.В. КОВТУН
ПЛОСКА КРАЙОВА ЗАДАЧА ДИСКРЕТНОГО СЕРЕДОВИЩА 160

М.В. МАРЧЕНКО, В.О. ХАРЖЕВСЬКИЙ
ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ТА РОЗМІРНОСТЕЙ 172

Я.П. РОМАНЧУК, Б.І. СОКІЛ, А.В. БАРАНОВ
ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ЕКСКАВАТОРІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ 177

О.Р. СТРІЛЕЦЬ
ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЗУПИННИКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ У ВИГЛЯДІ ЗАМКНУТОЇ ГІДРОСИСТЕМИ 183

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

О.Є. РУБАНЕНКО, А.А. ВИДМИШ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ 0,4 КВ 188

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, А.Г. ТКАЧУК, С.С. КОТЛЯР, О.І. ФАСОЛЯ
ТРАНСФОРМАТОРНИЙ ГРАВІМЕТР АВТОМАТИЗОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ 196

О.Я. ВОЛОШАНЮК, О.В. НЕЧИПОРЕНКО
СИНТЕЗ ПОДОБИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧОЮ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ 202

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, Ю.В. КИРИЧУК, Н.М. НАЗАРЕНКО
СТРУКТУРНА СХЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ У П'ЄЗОЕЛЕМЕНТІ 212

В.Д. КОСЕНКОВ, Д.А. ІВЛЄВ
КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ ДЛЯ ВИСОКИХ І НИЗЬКИХ ШВИДКОСТЕЙ ОБЕРТАННЯ 218

Ю.В. БАТИГІН, Т.В. ГАВРИЛОВА, Є.О. ЧАПЛИГІН, С.О. ШИНДЕРУК
ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ 222

О.О. РУБАНЕНКО
АНАЛІЗ НЕСТАБІЛЬНОСТІ НЕГАРАНТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 226

М.О. БАЖУРА, О.С. ПИВОВАР, О.В. ЦИРА
ОГЛЯД СТАНДАРТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ МЕРЕЖЕЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ 231

ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНОЇ, ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

А.І. БАБИЧ, В.П. КЕРНЕШ, М.А.КАХАРОВА, А.М. ЛИТОШКО, Т.М.ПЯТЕНКО
ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ ШКІРЯНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЛИЦЕВИМ ПОКРИТТЯМ ПІД МЕТАЛІК В ПРОЦЕСІ РОЗРОБКИ МОДЕЛІ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ПОВСЯКДЕННОГО ЖІНОЧОГО ВЗУТТЯ 235

С.С. ГАРКАВЕНКО, А.І. БАБИЧ, О.А. ОХМАТ, Т.М. ЛИПСЬКИЙ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ОЗДОБЛЮВАННЯ ШКІРЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ КРАСТ 243

В.М. ДУРАЧ, Л.Г. НІКОЛАЙЧУК
ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ТА ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗНАРКОТИЧНИХ КОНОПЕЛЬ ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В УКРАЇНІ 249

Г.А. БОЙКО, А.С. ТІХОСОВ
КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЛУБ'ЯНОЇ СИРОВИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 253

А.А. АТАМАНОВА, Т.О. КОЛЕСНИК, О.А. АНДРЕЄВА
СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ВИКОРИСТАННЯ ФЕРМЕНТІВ 257

Т.В. ЄЛІНА, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ У ПРОГНОЗУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРИКОТАЖУ 264

Л.А. МАЙСТРЕНКО, О.С. ЮНГІН, Л.О. ЛАСТОВЕЦЬКА
ЕКСТРАГУВАННЯ КОЛАГЕНУ З НЕДУБЛЕНИХ ВІДХОДІВ ШКІРЯНОГО ВИРОБНИЦТВА 269

О.В. ПАХОЛЮК, Г.О. ПУШКАР, І.С. ГАЛИК, Б.Д. СЕМАК
СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ НАНОНАУКИ, НАНОТЕХНОЛОГІЙ ТА РИНКУ НАНОПРОДУКЦІЇ В УКРАЇНІ ЗА ОСТАННІ ДЕСЯТИРІЧЧЯ 274

В. П. ПАЮК, О. В. ГЕЙДАРОВА, В. Д. КОСЕНКОВ, О. С. САВЕНКО
ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ З МЕТОЮ ВИЯВЛЕННЯ НЕЗАДОКУМЕНТОВАНИХ ЗАКЛАДОК ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ЛОКАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ 280

М.С. СТЕЧИШИН, Ю.М. БІЛИК, Н.С. МАШОВЕЦЬ, В.С. КУРСКОЙ
ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ ВІД ОБ'ЄМНОГО ВМІСТУ І РОЗМІРІВ ЧАСТИНОК ЗМІЦНЮЮЧОЇ ФАЗИ 286

О.Г. ТИМОЩУК
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ДЛЯ В'ЯЗКІСНОГО РЕЖИМУ ПЕРЕТІКАННЯ ГАЗУ 291

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, В.М. СЕРЕБРЕНИКОВ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ ПАСИВНОЇ ДОМІШКИ В РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПІД ВПЛИВОМ УЛЬТРАЗВУКУ 296

В.Ю. ЩЕРБАНЬ, О.З. КОЛИСКО, Ю.Ю. ЩЕРБАНЬ, М.І. ШОЛУДЬКО, Г.В. МЕЛЬНИК
СТРУКТУРА ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ ТА ПРОЦЕДУР КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ РЕКУРСІЇ 301

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-7-13
УДК 631.576.331.2:535

Н.М. ЗАЩЕПКІНА, В.І. АРТЕМЧУК
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОНТРОЛЬ ВИХОДУ МЕТАНУ У БІОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Біоенергетика є однією з найперспективніших складових відновлювальної енергетики України. Вона заснована на використанні енергії біомаси – вуглецевомістких органічних речовин рослинного та тваринного походження. Біомаса, на відміну від інших відновлюваних джерел енергії, є універсальним джерелом енергії, яке може використовуватися як для виробництва електричної та теплової енергії, так і для отримання біопалива на транспортні потреби. На сьогодні скорочення використання природного газу – одна з найактуальніших тем для економіки України, тому пошук альтернативних джерел енергії та впровадження енергозберігаючих технологій є актуальною задачею, оскільки дозволяє зменшити її залежність від імпортованих енергоносіїв та підвищити енергетичну безпеку. Енергетичні ресурси в наш час потрібні для різних галузей промисловості та забезпечення індивідуальних потреб людей. Виробництво та використання біогазу у якості джерела енергії є одним із важливих напрямків розвитку «зеленої енергетики» у аспекті створення нових відновлюваних джерел енергії. За останні роки значно зросла актуальність процесів виробництва біогазу та раціонального використання відходів сільськогосподарського виробництва. Особливе місце посідає в нетрадиційній енергетиці переробка біомаси (органічних, сільськогосподарських і побутових відходів) метановим шумуванням з одержанням біомаси та твердого залишку, яке використовують як найякісніше добриво. Це проявляється не тільки у збільшенні кількості нових біогазових установок, але і в зацікавленості в Україні цим напрямком все більшого числа фермерів, комунальних господарств, приватних господарств та державних контролюючих органів.

Метою роботи є контроль виходу метану у біоенергетичному виробництві. Вибрано інфрачервоний абсорбційний метод аналізу метану для розроблення вимірювання первинного перетворювача розроблена схема комбінована структура первинно вимірювальний перетворювач газоаналізатора. Використовуваний метод та засіб завдяки високій чутливості та вибірковості та достатній точності вимірювання концентрацій метану в широкому діапазоні є актуальним. Виробництво біогазу відповідає умовам «зеленої енергетики» та дозволяє підвищити енергетичну незалежність точкових споживачів зрідженого газу, а також, вирішити проблеми утилізації відходів, зокрема тваринництва, що покращує екологічну ситуацію.

Ключові слова: *біомаса, енергія, біогаз, метанове бродіння, оптико-абсорбційний аналізатор.*

N.M. ZASHCHEPKINA, V.I. ARTEMCHUK,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

METHANE YIELD CONTROL IN BIOENERGY PRODUCTION

Bioenergy is one of the most promising components of renewable energy in Ukraine. It is based on the use of biomass energy - carbon-containing organic matter of plant and animal origin. Biomass, unlike other renewable energy sources, is a universal energy source that can be used for the production of electricity and heat, as well as for the production of biofuels for transportation. Today, reducing the use of natural gas is one of the most pressing issues for Ukraine's economy, so the search for alternative energy sources and the introduction of energy-saving technologies is an urgent task. The use of renewable energy sources, primarily biomass, is relevant for Ukraine, as it reduces its dependence on imported energy and increases energy security. Energy resources are now needed for various industries and to meet the individual needs of people. Production and use of biogas as an energy source is one of the important areas of development of "green energy" in terms of creating new renewable energy sources. In recent years, the relevance of biogas production processes and the rational use of agricultural waste has increased significantly. A special place in non-traditional energy is the processing of biomass (organic, agricultural and household waste) by methane sludge to obtain biomass and solid residue, which is used as the highest quality fertilizer. This is manifested not only in the increase in the number of new biogas plants, but also in the interest in Ukraine in this area of an increasing number of farmers, utilities, private farms and state regulatory authorities. The aim of the work is to control the methane yield in bioenergy production. The infrared absorption method of methane analysis is chosen to develop the measurement of the primary converter, the scheme of the combined structure of the primary measuring converter of the gas analyzer is developed. The method and tool used, due to the high sensitivity and selectivity, and sufficient accuracy of measuring methane concentrations in a wide range is relevant. Biogas production meets the conditions of "green energy" and allows to increase the energy independence of point consumers of liquefied gas, as well as to solve the problems of waste disposal, including livestock, which improves the environmental situation.

Key words*: biomass, energy, biogas, methane fermentation, optical absorption analyzer.*

Вступ. Екологічна безпека є важливою частиною національної безпеки всіх країн. Вона складається із взаємопов’язаних компонентів а саме: природної та техногенної безпеки. Згідно з останніми дослідженнями, вже до кінця XXI століття може виникнути проблема вичерпання основних видобувних енергоносіїв, таким чином, енергія із відновлювальних ресурсів набуває все більшої актуальності в усьому світі.

Сучасна енергетика має переломний період зросту та водночас очікування неминучих якісних змін. Стрімке зростання енергоспоживання відбувається в умовах виснаження та удорожчання основного світового енергетичного ресурсу, що забезпечує майже 40% світового енергоспоживання – нафти, і складності пошуку адекватної їй заміни. Великий вплив на збільшення парникового ефекту впливають викиди вуглекислого газу.

У більшості розвинених країн масштаби використання «зеленої енергетики» стрімко зростають та отримують всебічне сприяння та підтримку на державному рівні: податкові послаблення, спрощений режим ввозу необхідного для роботи «зеленої енергетики» обладнання, пільгові умови продажу підприємствами галузі виробленого продукту, довготермінові контракти із державними профільними агентствами.

Поновлювальні або альтернативні джерела енергії – це джерела енергії природного походження, які постійно поповнюються. До них відносяться:

- біопалива (біодизель, біогаз, генераторний газ, брикети і гранули з відходів деревини, соломи, лузги та інших);
- енергія сонця (сонячні колектори);
- енергія вітру (вітрогенератори);
- енергія води (гідроелектростанції);
- геотермальна енергія;
- енергія біомаси.

Слід зазначити, що цінність окремих технологій відновлюваної енергетики визначається тим, яку кількість традиційних енергоресурсів вони можуть замінити. ГЕС, вітроелектричні станції, фотоелектричні установки можуть виробити майже втричі більше електроенергії, ніж отримують за рахунок спалювання викопного палива. Це відбувається шляхом прямого перетворення механічної в електричну енергію без додаткового використання теплової енергії за рахунок спалювання енергоносіїв.

Біоенергетика є однією з найперспективніших складових відновлюваної енергетики України. Вона заснована на використанні енергії біомаси вуглецевмісних органічних речовин рослинного та тваринного походження (деревина, солома, рослинні залишки сільськогосподарського виробництва, гній тощо). В той же час, виробництво енергії з біомаси потребує створення систем контролю виробництва для адитивного використання біоресурсів та оптимізації технологічного процесу.

Постановка проблеми. Широке коло альтернативних джерела енергії є перспективними у точковому виробництві енергії, а саме отримання енергії із біомаси, біогазу із органічних відходів, біогазу що утворюється при роботі каналізаційно-очисних станцій. Все більшого розповсюдження набуває використання вторинних енергетичних ресурсів, до яких належать доменний та коксівний гази, газ метан що утворюється при дегазації вугільних родовищ, перетворення скидного енергопотенціалу технологічних процесів [1–3].

Найбільшими споживачами паливно-енергетичних ресурсів є аграрні підприємства, тому гострою необхідністю є впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій, зорієнтованих на виробництво біологічних видів палива [1]. Виготовлення біогазу є ефективною та інвестиційно привабливою технологією, що зумовлюється наявністю значного сировинного потенціалу, сприятливими природнокліматичними умовами та низьким рівнем собівартості даного виду енергії.

Вихідною речовиною для виробництва біогазу є біомаса – органічна речовина рослинного або тваринного походження, яка може використовуватися в якості альтернативного джерела енергії. Стандартними біомасами є: деревина, солома, осад стічних вод, комунальні відходи. Велика кількість біомаси утворюється при виробництві і переробці продукції. Біогаз, що утворюється із відходів тваринного походження, отримують шляхом ферментації тваринного посліду. Видобувати, біогаз можна з відстоїв органічних стоків, органічних відходів зі сміттєзвалищ. Біомасою є також піролізний газ, що використовується для роботи двигунів внутрішнього згоряння. За статистикою, світові ресурси біомаси є джерелом приблизно 44 ЕДж енергії на рік. Підтверджені ресурси біомаси у світі становлять близько 276 ЕДж за рік [4].

Метанову бродінню піддається сировина, яку можна поділити на три категорії:

- сільськогосподарську: гній, енергетичні культури, гноївка, залишки біомаси та ін.;
- промислову: відходи скотобоєнь, молочних і цукрових заводів, крохмаль, фармацевтичної, косметичної та паперової промисловості та ін.;
- господарську: органічні відходи, комунальні стоки та ін.

Ферментаційний матеріал можна також розділити на основний (ферментація якого може протікати самостійно, без додавання інших речовин) та допоміжний [1].

Головним ферментаційним матеріалом є гній, гноївка, молода трава, а допоміжним – відходи від переробки фруктів, органічні відходи, залишки їжі, жири, меляса, органічні продукти, що розкладаються природно (біологічним шляхом), господарські стоки тощо [1].

Один із способів виробництва енергії з біомаси – отримання біогазу шляхом анаеробного ферментативного бродіння. Утворений газ являє собою суміш що містить 65% метану, 30% вуглекислого газу, 1% сірководню і незначну кількість азоту і водню.

Зважаючи на структуру енергетичних ресурсів України і обсяги виробництва та використання енергії, переваги біогазу, що містить метан, перед природним газом є вагомими. Тому актуальним є контроль технологічних процесів його виробництва і застосування в промисловості та побуті.

Виклад основного матеріалу. Біогаз – це газ, який виробляється із органічних відходів в процесі ферментації або піролізу і має склад, подібний до природного газу: до 98% метану, а також містить сірководень, вуглекислий газ, воду тощо [2].

В природі Землі метан досить поширений. Горючі природні гази складаються на 90–97 % з метану.

Під назвою «рудниковий газ» метан нагромаджується у вугільних шахтах, внаслідок виділення з пластів вугілля і супутніх порід, в яких знаходиться у вільному та зв'язаному вигляді.

З повітрям метан утворює вибухові суміші. При вмісті в повітрі до 5-6 % метан горить біля джерела тепла (т-ра запалення 650–750 °С), при вмісті 5–15,2(16)% – вибухає, понад 16 % – може горіти при припливі кисню, зниження при цьому концентрації метану вибухонебезпечне.

Основний компонент природних 77–99 %, супутніх нафтових 31–90 %, рудникового та болотного газів. Є парниковим газом. Метан має слабку наркотичну дію. ГДК 300 мг/ м³. Фізико-хімічні властивості метану CH_4 наведені в таблиці 1 [2].

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості метану CH_4 як продукту біонерегетичного виробництва.

Брутто-формула (система Хилла)	CH_4
Молекулярна маса (в а.е.м.)	16,04
Температура плавлення (в °С)	-182,48
Температура кипіння (в °С)	-161,49
Показник дисоціації	pKa (1) = 40 (20 С, вода)
Діелектрична проникність	1,7 (-173°С)
Дипольний момент молекули (у дебаях):	0 (20°С)
Бруто-формула (система Хілла)	CH_4
Питома теплоємність при постійному тиску (у Дж/г·К)	2,22 (°С)
Стандартна ентальпія утворення ΔН (298 ДО, кДж/моль)	-74,85 (г)
Стандартна енергія Гіббса утворення G (298 ДО, кДж/моль)	-50,79 (г)
Стандартна ентропія утворення S (298 ДО, Дж/моль·К)	186,19 (г)
Стандартна мольна теплоємність Ср (298 ДО, Дж/моль·К)	35,71 (г)
Ентальпія плавлення ΔН пл (кДж/моль)	0,94
Ентальпія кипіння ΔН кип (кДж/моль)	8,178
Температура самозапалювання на повітрі (°С)	537
Теплота згоряння Qp (кДж/моль)	882
Критична температура (в °С)	-82,3
Критичний тиск (у Мпа)	4,71
Критична щільність (у г/см3)	0,162
Теплопровідність (**10-7кал/см-1- с-1град-1)**	721

Переваги біогазу що містить метан, порівняно із природним газом, полягають в наступному:

– Біогаз видобувається із біологічної сировини, тобто його виробництво і спалювання є частиною природного циклу вуглецю, що не приводить до накопичення природного газу в атмосфері і парникового ефекту. Природний газ добувається з глибини землі, він не є частиною атмосфери, отже, при його спалюванні відбувається накопичення вуглекислого газу.

– Біогаз є відновлювальним джерелом енергії, це означає що він ніколи не вичерпається. Так як запасів природного газу і нафти при стрімкому використанні вистачить не більше, ніж на 70–100 років.

– Сировина для біогазу знаходиться поблизу споживача й неподалік від заводів. Відпадає необхідність перевезення газу на великі відстані.

Серед наведеного переліку технологічних рішень використання альтернативних джерел енергії, найбільш актуальними по критерію «затрати – отриманий результат» є саме методи виробництва енергії із біомаси: газифікація біомаси (деревини); переробка відходів життєдіяльності тварин і компосту у рослинництві; метод прямої конверсії біомаси в паливо; метод хімічної обробки рослинного масла або тваринних жирів; метод вирощування і переробки водоростей.

Аналізуючи методи виробництва енергії із біомаси можна необхідно звертати увагу на технологічні умови. В першу чергу, це температура та тиск проходження процесів, кількісний та якісний контроль складу продукту, що отримують на виході технологічних установок.

Процес енергетичного виробництва з біомаси повинен включати максимально автоматизовану систему контролю параметрів технологічного процесу, основні показники яких зазначено на таблиці 2.

Таблиця 2

Методи виробництва та обґрунтування показників системи контролю виходу метану в біоенергетичному виробництві.

Методи визначення енергії	**Характеристика і умови**	**Продукти що утворюються**
Газифікація (деревини)	Піроліз деревини Температура 200С до 900С	CH_4 50 – 70% CO_2 30 – 40% CO, H_2
Виробництво біогазу з сільськогосподарських продуктів (солома	Ферментація мікроорганізмами метаногенами	**CH_4** CH_4 50 – 70% CO_2 30 – 40%

Методи визначення енергії	Характеристика і умови	Продукти що утворюються
зернових, хлібів, стебла кукурудзи, гичка цукрових буряків, картопляне бадилля)	(процес метаногенезу) Температура 800С	H_2 , NH_3, NO NO_2 – 0,2 – 0,4%, H_2S – 6 г $/_{100м^3}$
Пряма конверсія біомаси (целюлози)	Селективний каталітичний піроліз на целолітному каталізаторі Температура 600С	CO, CO_2**CO_2** і вода (H_2O)
Хімічна обробка рослинного та тваринного жиру	Біодизельно паливо Температура 200С до 900С	CO, CO_2**CO_2** , SO_2**SO_2** та CH_4
Вирощування і переробка водоростей	Бродіння в спирт або метан Температура 700С	Спирт та метан

Методи вимірювання концентрації метану можна розділити на механічні, акустичні, теплові, магнітні, оптичні, іонізаційні, мас-спектрометричні, електрохімічні, напівпровідникові.

В оптичних методах вимірюють оптичну щільність (абсорбційні методи), інтенсивність випромінювання (емісійні методи), коефіцієнт заломлення (рефрактометрія).

Широко використовується оптико-акустичний метод, заснований на пульсації тиску газу в приймачеві випромінювання при поглинанні переривчастого потоку випромінювання, що пройшов через аналізований газ. Метод дозволяє визначати CO, CO_2, CH_4, NH_3, SO_2, ряд органічних сполук.

Абсорбційні методи, засновані на вимірі селективного поглинання ІК, УФ або видимого випромінювання контрольованим компонентом, застосовують для вибіркового визначення NO_2, O_3, H_2S, SO_2, CS_2, формальдегіду, фосгену, Cl_2, парів Hg, Na, Pb та інших. Метод оптично-абсорбційного аналізу сполук метану використовується також для моніторингу вмісту сполук відпрацьованих газів ДВЗ, особливо їхніх токсичних компонентів [3].

У більшості абсорбційних методів у якості джерела випромінювання застосовуються лампи розжарювання, ртутні, водневі, ртутно-кадмієві, кадмієві, ніхромові спіралі.

Однак, у даний час більшість ІЧ аналізаторів працюють, в основному, у ближній, та частково, у середній області ІЧ спектра, а використання більш довгохвильової частини спектра обмежена відсутністю надійних джерел та приймачів випромінювання, дешевих та загальнодоступних оптичних матеріалів та ін. Усе це знижує надійність аналізаторів при експлуатації, а в окремих випадках виключає їхнє застосування зовсім.

Тому однією з основних задач ІЧ аналізу є розробка спеціальних фільтрів ІЧ випромінювання, що дозволяє виділити вузькі ділянки спектра властиві певній газовій компоненті, при цьому володіючи мінімальним коефіцієнтом поглинання ІЧ-випромінювання. Вимірювачі повинні володіти великою потужністю випромінювання джерел світла та приймачами випромінювання з високою чутливістю в області довжин хвиль до 20 мкм.

В той же час, широкі аналітичні можливості ІЧ методу, висока вибірковість, заснована на використанні характерних для речовин смуг поглинання ІЧ енергії та висока селективна чутливість виділяє його серед інших фізичних та фізико-хімічних методів (кулонометрії, кондуктометрії та т.д.) та робить цей метод найбільш широко застосованим у різних галузях промисловості [4–10].

Метод оптично-абсорбційного аналізу сполук метану має ряд переваг, порівняно з іншими методами. Перевагами абсорбційного методу аналізу в ІЧ області спектру є:

а) висока швидкодія;

б) висока селективність;

в) можливість автоматизації процесу вимірювання, а також сполучення з ЕОМ;

г) широкий діапазон вимірювання концентрацій окису вуглецю та вуглеводнів;

д) висока точність вимірювання.

Визначення сполук речовин інфрачервоним методом, вирішують багато задач у різних галузях промисловості, таких як хімічна, металургійна, нафтова і інше [3].

Інфрачервоний метод має широке застосування для визначення різних речовин та, у першу чергу, органічних сполук при малих та великих концентраціях їх у газових сумішах.

ІЧ метод аналізу базується на основному законі поглинання електромагнітного випромінювання – законі Бугера-Ламберта-Бера [7]:

$$\Phi = \Phi_o \; e - z_y \lambda cl \; = \Phi_o e - D \qquad (1)$$

де Φ_o – інтенсивність світлового потоку; Φ – інтенсивність світлового потоку після проходження шару речовини; z_y – коефіцієнт поглинання; c – концентрація; l – товщина шару; D – оптична густина речовини.

Враховуючи можливості ІЧ техніки, основним діапазоном аналізу складу речовин рахують область ІЧ спектра до 15 мкм. Тому розбивши цей діапазон на три під діапазони: до 5 мкм**,** 5-10 мкм; 10-15 мкм, можна класифікувати аналізовані речовини, у залежності від розміру поглинання ІЧ енергії, узявши за основу три групи по величині поглинання: I – 70-100 %; II – 40-70%; III – до 40%.

Основою задачею ІЧ методу є найбільш повне забезпечення аналізу складу речовин І групи з максимальною точністю та хоча б часткове груп ІІ та ІІІ, для речовин, що не ввійшли у групу І.

За попередніми даними, що в деяких випадках, особливо в піддіапазонах до 5 мкм та від 5 до 10 мкм, відбувається перекриття областей поглинання (або дуже близьке їхнє розташування) ІЧ енергії різними речовинами (наприклад: окис та двоокис вуглецю та окису азоту та ін.), що в більш довгохвильовому діапазоні майже не спостерігається. Тому потрібне використання спектральних фільтрів ІЧ-випромінювання, що дозволяє виділити вузькі ділянки спектру властиві вибраному газовому компоненту, при цьому володіючи мінімальним коефіцієнтом поглинання [4].

Розглянувши промислові зразки доступних в Україні вимірювачів сполук C_xH_y.та можна зробити висновок, що всі вони містять в собі випромінювач, світлофільтр, вимірювальну кювету, обтюратор та підсилювач. Було враховано використання стабілізації нульових показів газоаналізатора (ГА) за рахунок автоматичної корекції напруги джерела ІЧ-випромінювання, схемні рішення багатоканального ІЧ газоаналізатора, газоаналізатору з подвійним ходом променя.

Отже, для проектування газоаналізатору контролю виходу метану у біоенергетичному виробництві було вибрано 2-канальну різницеву схему порівняння сигналів вимірювальної інформації на виході зразкового та основного вимірювального каналів.

Схема комбінована структурна інфрачервоного аналізатору контролю концентрації CH_4 у виході біоенергетичного виробництва наведена на рисунку 1.

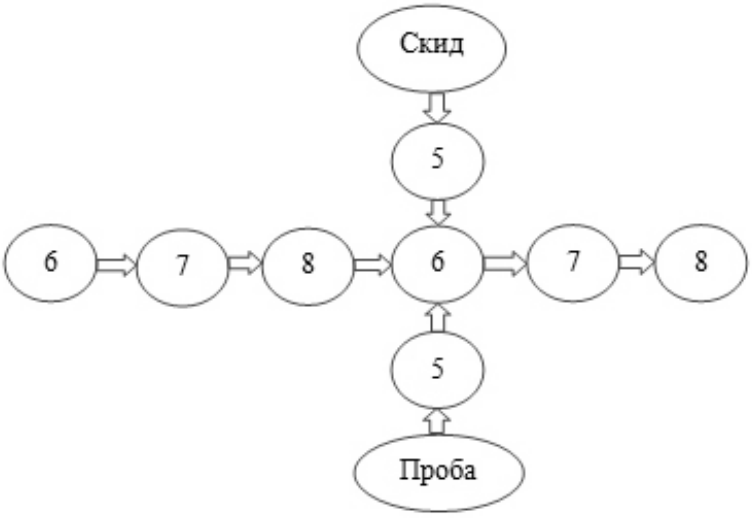


Рис. 1. Схема комбінована структурна оптико-абсорбційного аналізатора CH_4: 1 – джерело випромінювання; 2 – оптична система випромінювача; 3 – модулятор з світлофільтрами; 4 – система підготовки проби; 5 – система утилізації проби; фотоприймальний пристрій; 6 – попередній підсилювач

На початку вимірювань проба від пробовідбірника потрапляє в систему підготовки проби, там вона фільтрується від мікрочастинок бруду та пилу. Наступний етап включає внесення аналізованої суміші у вимірювальну кювету, потім в систему утилізації проби, де відбувається фільтрація газоповітряної суміші від шкідливих речовин для подальшого скиду газу в оточуюче середовище.

Потік ІЧ-випромінювання проходить через вимірювальну кювету, де його частина поглинається аналізованим газом. Потім, випромінювання потрапляє на робочий та порівнювальний світлофільтри, які вбудовані у модулятор. Робочий світлофільтр пропускає довжину хвилі, яка поглинається вимірювальним газом CH_4, а порівнювальний світлофільтр формує довжину хвилі, яка буде відповідати нульовому газу. Після інтерференційних фільтрів модульоване випромінювання, по черзі із вимірювального та порівняльного каналів поступає на фотоприймач, де здійснюється перетворення його в електричний сигнал. Далі за допомогою оптопари відбувається синхронізація даних двох сигналів – різницеве зрівняння.

Після обробки у фотоприймачі, аналоговий сигнал вимірювальної інформації потрапляє на попередній підсилювач, де він підсилюється до необхідного значення по струму чи напрузі. Підсилений сигнал потрапляє на вторинний вимірювальний перетворювач.

У якості джерела інфрачервоного випромінювання в аналізаторі використовуються відкриті або ізольовані від навколишнього середовища провідники, що нагріваються електричним струмом, з металів, що мало окислюються, і сплавів, таких як ніхром, платина та ін. Тому, вибираємо ніхромову спіраль у вигляді циліндричного тіла розжарювання з поперечним перерізом 0,3 мм. Споживана потужність тіла розжарювання складає 4 Вт, опір – приблизно 1Ом. Вибір обґрунтовано дешевизною та простотою конструкції.

Розрахована потужність випромінювача з умов економічності напруги та умов розроблення такого елементу ПВП, в якому розміри і маса будуть мінімальні, буде складати:

$$P = I^2R = 4 \cdot 1 = 4\,[\text{Вт}], \tag{2}$$

де P – споживана потужність випромінювача; I = 2 А, сила постійного струму в колі первинного вимірювального перетворювача (ПВП); R = 1 Ом – опір ніхромового дроту;

$$R = \frac{\rho l}{s} \tag{3}$$

де ρ = 0,06 Ом/мм – питомий опір провідника; l – довжина провідника; d = 0,3 мм, – діаметр провідника.

Розрахована довжина ніхромового дроту, необхідна для виготовлення нагрівального елементу випромінювача буде складати:

$$l = \frac{Rd}{\rho} = \frac{1 \cdot 0,3}{0,06} = 50 \left[\text{мм}\right] \cdot \tag{4}$$

Для отримання максимального потоку випромінювання нагрівальний елемент необхідно розташувати у фокусі увігнутого віддзеркалювача, діаметр якого дорівнює діаметру кювети відповідно до структурної схеми рисунку 1.

Світлофільтр вибрано за такою характеристикою як коефіцієнт пропускання, що має бути максимальним. Найбільше поставленій умові відповідають смугові інтерференційні фільтри, які складаються з декількох діелектричних шарів накладених почергово. Такі фільтри дозволяють отримати дуже вузькі смуги в інфрачервоній із найвищим коефіцієнтом пропускання 0,85.

У ІЧ-аналізаторах найчастіше використовуються піроелектричні приймачі ІЧ випромінювання їх перевагами є: велика швидкодія при високій пороговій чутливості; велике значення коефіцієнту перетворення; великий динамічний діапазон; не потребують джерел живлення.

Використано приймач оптичного випромінювання піроелектричний МГ-30, який призначений для реєстрації та вимірювання модульованого випромінювання в діапазоні λ = 2...20 мкм та перетворення енергії модульованого випромінювання в електричний сигнал.

Смуга пропускання фотоприймача визначається:

$$R \cdot \Delta f = k \Delta f \ , \tag{5}$$

де Δf – зміна частоти; k – коефіцієнт при квадратній формі імпульсу.

Функція перетворення первинного перетворювача має вигляд:

$$U_{\text{вих}} = K_{\text{вдВ}} \cdot \tau_{\text{вік}^2} \cdot \tau_{\text{кюв}} \cdot \tau_{\Phi} \cdot \tau_{\text{П}}, \tag{6}$$

де $U_{\text{вих}}$– напруга на виході з приймача випромінювання; $K_{\text{вдв}}$ – коефіцієнт використання джерела випромінювання; $\tau_{\text{вік}^2}$. – коефіцієнт, що характеризує поглинання випромінювання віконцями кювети; $\tau_{\text{кюв}}$ – коефіцієнт пропускання кювети; τ_{Φ} – коефіцієнт, що характеризує вплив світлофільтру на інтенсивність випромінювання; S – чутливість приймача випромінювання; $K_{\text{П}}$– функція перетворення підсилювача.

Функція перетворення підсилювача – це його коефіцієнт підсилення має бути таким, щоб забезпечувати належне підсилення сигналу при мінімальній і максимальній концентрації CH_4 у всьому діапазоні [6]. Для приймача МГ-30 при чутливості S = 1000 В/Вт, коефіцієнт підсилення буде рівний: $K_{\text{П}}$= 10.

За відсутності у кюветі аналізованого газу інтенсивність випромінювання, яка пройшла крізь робочий і опорний канали, однакова. Поява вимірюваного газу в кюветі послабить випромінювання в робочому каналі, а приймач випромінювання зареєструє модульоване різницеве випромінювання між робочим і опорним каналами, пропорційно концентрації вимірюваного газу. Далі сигнал потрапляє у блок відображення інформації, де ми маємо можливість візуально оцінити концентрацію вимірюваного компоненту на цифровому або стрілочному табло.

Висновки.

Виробництво біогазу дає можливість отримання енергозалежність споживачів, особливо точкових, створити нові робочі місця, вирішити проблеми утилізації відходів, зокрема тваринництва, покращити екологічну ситуацію. Біогаз є досить цінним серед поновлювальних джерел енергії, оскільки може застосовуватись в різних сферах електроенергетики, виробництва тепла та в якості пального, а також може вироблятися відповідно до потреб на основі наявної місцевої сировини.

Вибраний інфрачервоний метод вимірювання виходу метану у біоенергетичному виробництві є вдалим для вирішення задачі контролю його відносних концентрацій у технологічних процесах виробництва біогазу. Пропонований метод та засіб мають високу чутливість та вибірковість, достатню швидкодію, широкий діапазон вимірювання та прийнятну точність вимірювань, особливо у випадку поточної діагностики виходу метану із біомаси. ІЧ-метод забезпечує кількісне визначення сполук метану відносних концентрацій 0,1–99,9%.

Розглянута схема комбінована структурна аналізатору містить джерело інфрачервоного випромінювання на основі ніхромової нитки, кювету, інтерференційний світлофільтр, піроелектричний приймач випромінювання, модуляційний диск та попередній підсилювач. Оптично-абсорбційний аналізатор є особливо чутливим до молекул окису вуглецю та вуглеводів, що говорить про доцільність використання цього методу для визначення концентрації сполук виду CO_n та C_xH_y.

Література

1. Аналіз шляхів модернізації перемішуючого пристрою біогазової установки : навчальні матеріали онлайн [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream

2. Альтернативні джерела енергії // Законодавство України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/TM050043.html

3. Штифорук Є.В. Інструментально-методичне забезпечення контролю викидів котелень : навчальні матеріали онлайн [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26967/1/Shtiforuk_magistr.pdf

4. Комплекс з виробництва електроенергії з біогазу, отриманого шляхом анаеробного зброджения відходів сільського господарства та тваринництва : навчальні матеріали онлайн [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/3157/reports/9581285db9cfb73e2ce7364706a11e29.pdf

5. Офіційний сайт Кабінету Міністрів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.kmu.gov.ua

6. Академперіодика Стратегія енергозбереження в Україні : аналіт.-довід. матеріали за ред. В.А. Жовтянського, М.М. Кулика, Б.С. Стогнія. – 2006. – Т.1. – 510 с.

7. Анисимова Г.М. Влияние условий загрязнения окружающей среды на репродукцию расстений / Г.М. Анисимова, И.В. Лянгузова, И.И. Шамров // Эмбиология цветковых расстений. Терминология и концепции / под ред. Батыгиной Т.Б. – СПб : Мир и семья, 2000. – С. 532–536.

8. Альтернативна енергетика : [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / [М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко та ін.]. – К. : Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.

9. Гелетуха Г.Г. Сучасний стан та преспективи розвитку біоенергетики в Україні [Електронний ресурс] / Гелетуха Г.Г., Желэзна Т.А. – Режим доступу : http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60547 2010р.

10. Bookzone. Відновлювальні джерела [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://bookzone.com.ua/books/31040-vidnovlyuvalni-dzherela-energii.

References

1. Analysis of ways to upgrade the mixing device of a biogas plant. Training materials online. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream 2020.

2. Alternative energy sources. Legislation of Ukraine. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/TM050043.html 2008.

3. Shtyforuk E. V. Instrumental and methodological support for Boiler Room emission control. Training materials online. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26967/1/Shtiforuk_magistr.pdf

4. Complex for generating electricity from biogas obtained by anaerobic digestion of agricultural and livestock waste. Training materials online. URL: http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/3157/reports/9581285db9cfb73e2ce7364706a11e29.pdf

5. Official Website of the Cabinet of Ministers of Ukraine. URL: www.kmu.gov.ua

6. KAkademperiodika strategy of energy saving in Ukraine : analytical and experimental materials edited by V. A. Zhovtyansky, M. M. Kulik, B. S. Stogniy. Moscow, 2006, Vol. 1, 510 p. (in Russian).

7. Anisimova G. M., Lyanguzova I. V., Shamrov I. I. influence of environmental pollution conditions on the reproduction of plants. Terminology and concepts. T. Z. ed.by Batygina T. B. St. Petersburg. Mir I Semya publ., 2000. P. 532-536.

8. Alternative Energy: textbook for students. higher educational institution. M. D. Melnichuk, V. O. Dubrovin, V. G. Mironenko and others. K.: Agrarian Media Group, 2012. 244 p.

9. Geletukha G.G., Zhelezna T.A. Current state and prospects of bioenergy development in Ukraine. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60547 2010.

10. Bookzone. Renewable sources. URL: https://bookzone.com.ua/books/31040-vidnovlyuvalni-dzherela-energii.

Надійшла / Paper received : 04.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-14-20
УДК 621.396.12

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, Т.Л. ГОНЧАРУК
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В розрядно-цифровому способі кодування інформація про переданий розряд визначається видом сигналу на одиничному (найквістовому) інтервалі. В таймерних сигнальних конструкціях (ТСК), на відміну від розрядно-цифрового способу кодування, інформацію закладено у тривалостях декількох окремих часових відрізків сигналу на інтервалі конструкції і їх взаємному положенні. З метою зменшення міжсимвольних спотворень, тривалість часових відрізків складає не менше найквістового інтервалу. Часовий відрізок показує частину одиничного елемента і визначається завадами у каналі зв'язку та припустимою ймовірністю помилкового приймання сигнальної конструкції.

В науковій статті проведено дослідження ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку залежно від завадостійкості та інформаційних параметрів таймерних сигнальних конструкцій.

Ключові слова: таймерна сигнальна конструкція, інформація, завадостійкість, найквістовий елемент, значущі моменти модуляції, число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій, пропускна здатність каналу зв'язку.

V.I. LUZHANSKY, D.A. MAKARUSHKIN, T.L. HONCHARUK
Khmelnytskyi National University

INVESTIGATION OF CHANNEL PERFORMANCE DEPENDING ON DIFFICULTY AND INFORMATION PARAMETERS OF TIMER SIGNAL STRUCTURES

In the bit-digital encoding method, the information about the transmitted bit is determined by the type of signal on a single (quest) interval. In timer signal constructions (TSCs), in contrast to the bit-digital encoding method, the information is laid down in the durations of several separate time segments of the signal on the design interval and their relative position. In order to reduce inter-character distortion, the duration of time intervals is at least the most quiz interval. The time interval shows the part of a single element and is determined by the interference in the communication channel and the allowable probability of erroneous reception of the signal structure. The reason for the increase in channel bandwidth when using TSC is the importance of creating more signal structures at a given time interval than when using bit-digit code. Increasing the bandwidth of the communication channel leads to an increase in the transmission rate of digital information flows at a given communication quality. In the scientific article the research of efficiency of use of timer signal designs for increase in throughput of the communication channel depending on noise immunity and information parameters of timer signal designs is carried out.

Keywords: timer signal construction, information, noise immunity, quest element, significant modulation moments, number of realizations of timer signal constructions, communication channel bandwidth.

Вступ

У таймерних сигнальних конструкціях інформація про переданий символ закладена не в значеннях окремих двійкових цифр кодового числа, а в місцях знаходження значущих моментів модуляції (ЗММ) і на інтервалі формування сигнальних конструкцій. Причина збільшення пропускної здатності каналу при використанні ТСК – важливість створення на заданому часовому інтервалі більше сигнальних конструкцій, ніж при використанні разрядно-цифрового коду.

Збільшення пропускної здатності каналу зв'язку призводить до зростання швидкості передачі цифрових потоків інформації при заданій якості зв'язку.

Метою наукової статті є оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку.

Результати дослідження.

Потужність реалізованого ансамблю N_{PT} на інтервалі $T_{CK} = m \cdot t_0$ визначається наступним виразом:

$$N_{PT} = \frac{(ms - i(s-1))!}{i!(ms - is)!}, \quad (1)$$

де i – число заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова довжиною m найквістових елементів;

Δ – частина елемента t_0 –($\Delta = t_0/s$), $s \in (2;3;..s_0)$ – цілі числа, яка забезпечує розпізнавальну здатність тривалостей окремих відрізків із заданою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку.

Наприклад, для $m = 7$ і $s = 6$ при синтезі сигнальної конструкції з п'яти інформаційних відрізків ($i = 5$):

$$N_{PT} = \frac{17!}{5! \cdot 12!} = 6188 .$$

У таблицях 1–8 наведено число реалізацій ТСК, які розраховані при різних значеннях m ($m \in 2 \div 15$**)** для i=1;2;3;4;5;6;7;8; $s \in 2 \div 20$ (рис. 1).

Із таблиць 1–8 випливає:

1) число реалізацій ТСК N_{PT} зростає зі збільшенням параметрів *m* і *s*;

2) при $i = m$ можлива тільки одна реалізація(N_{PT} = 1);

3) при $i < m$ число реалізацій N_{PT} =0 .

На основі таблиці 2 надано залежності тривалості сигнальних конструкцій за заданої потужності кодових множин і параметра *s*.

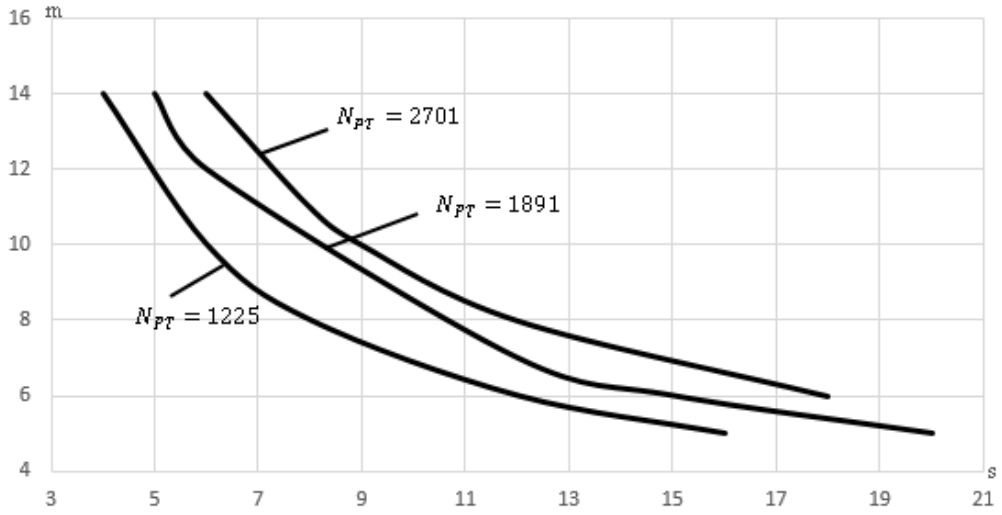


Рис. 1. Залежності *m* = *f* (*s*) при *N* = const

Далі, на основі даних взятих з таблиці 5, було проведено дослідження залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів за наступними формулами:

- значення пропускної здатності каналу зв'язку:

$$C_m = \frac{1}{m} \cdot (\log_2 N_{PT} - H_{BT}), \tag{2}$$

де $H_{\text{ВТ}}$ – визначає втрати в каналі через невизначеність у прийманні кодової сигнальної конструкції.

Таблиця 1

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ **для i=1**$i = 1; s = 2 \div 20$

i	*S*	*m*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
1	2	N_{PT}	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
	3	N_{PT}	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43
	4	N_{PT}	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57
	5	N_{PT}	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71
	6	N_{PT}	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85
	7	N_{PT}	8	15	22	29	36	43	50	57	64	71	78	85	92	99
	8	N_{PT}	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113
	9	N_{PT}	10	19	28	37	46	55	64	73	82	91	100	109	118	127
	10	N_{PT}	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141
	11	N_{PT}	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144	155
	12	N_{PT}	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145	157	169
	13	N_{PT}	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144	157	170	183
	14	N_{PT}	15	29	43	57	71	85	99	113	127	141	155	169	183	197
	15	N_{PT}	16	31	46	61	76	91	106	121	136	151	166	181	196	211
	16	N_{PT}	17	33	49	65	81	97	113	129	145	161	177	193	209	225
	17	N_{PT}	18	35	52	69	86	103	120	137	154	171	188	205	222	239
	18	N_{PT}	19	37	55	73	91	109	127	145	163	181	199	217	235	253
	19	N_{PT}	20	39	58	77	96	115	134	153	172	191	210	229	248	267
	20	N_{PT}	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	281

Таблиця 2

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ для i=2$i = 1; s = 2 \div 20$

i	*S*	*m*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
2	2	N_{PT}	1	6	15	28	45	66	91	120	153	190	231	276	325	378
	3	N_{PT}	1	10	28	55	91	136	190	253	325	406	496	595	703	820
	4	N_{PT}	1	15	45	91	153	231	325	435	561	703	861	1035	1225	1431
	5	N_{PT}	1	21	66	136	231	351	496	666	861	1081	1326	1596	1891	2211
	6	N_{PT}	1	28	91	190	325	496	703	946	1225	1540	1891	2278	2701	3160
	7	N_{PT}	1	36	120	253	435	666	946	1275	1653	2080	2556	3081	3655	4278
	8	N_{PT}	1	45	153	325	561	861	1225	1653	2145	2701	3321	4005	4753	5565
	9	N_{PT}	1	55	190	406	703	1081	1540	2080	2701	3403	4186	5050	5995	7021
	10	N_{PT}	1	66	231	496	861	1326	1891	2556	3321	4186	5151	6216	7381	8646
	11	N_{PT}	1	78	276	595	1035	1596	2278	3081	4005	5050	6216	7503	8911	10440
	12	N_{PT}	1	91	325	703	1225	1891	2701	3655	4753	5995	7381	8911	10585	12403
	13	N_{PT}	1	105	378	820	1431	2211	3160	4278	5565	7021	8646	10440	12403	14553
	14	N_{PT}	1	120	435	946	1653	2556	3655	4950	6441	8128	10011	12090	14365	16868
	15	N_{PT}	1	136	496	1081	1891	2926	4186	5671	7381	9316	11476	13861	16700	19230
	16	N_{PT}	1	153	561	1225	2145	3321	4753	6441	8385	10585	13041	15732	18865	21991
	17	N_{PT}	1	171	630	1378	2415	3741	5356	7260	9453	11935	14669	17832	21212	24801
	18	N_{PT}	1	190	703	1540	2701	4186	5995	8128	10585	13366	16700	19898	23700	27876
	19	N_{PT}	1	210	780	1711	3003	4656	6670	9045	11781	14800	18336	22123	26394	30861
	20	N_{PT}	1	231	861	1891	3321	5151	7381	10011	13041	16471	20304	24561	29187	34203

Таблиця 3

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ для i=3$i = 1; s = 2 \div 20$

i	*S*	*m*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
3	2	N_{PT}	0	1	10	35	84	165	286	455	680	969	1330	1771	2300	2925
	3	N_{PT}	0	1	20	84	220	455	816	1330	2024	2925	4060	5456	7140	9139
	4	N_{PT}	0	1	35	165	455	969	1771	2925	4495	6545	9139	12341	16215	20825
	5	N_{PT}	0	1	56	286	816	1771	3276	5456	8436	12341	17296	23426	30856	39711
	6	N_{PT}	0	1	84	455	1330	2925	5456	9139	14190	20825	29260	39711	52394	67525
	7	N_{PT}	0	1	120	680	2024	4495	8436	14190	22100	32509	45760	62196	82160	105995
	8	N_{PT}	0	1	165	969	2925	6545	12341	20825	32509	47905	67525	91881	121485	156849
	9	N_{PT}	0	1	220	1330	4060	9139	17296	29260	45760	67525	95284	129766	171700	221815
	10	N_{PT}	0	1	286	1771	5456	12341	23426	39711	62196	91881	129766	176851	234136	302621
	11	N_{PT}	0	1	364	2300	7140	16215	30856	52394	82160	121485	171700	234136	310124	400995
	12	N_{PT}	0	1	455	2925	9139	20825	39711	67525	105995	156849	221815	302621	400995	518665
	13	N_{PT}	0	1	560	3654	11480	26235	50116	85320	134044	198485	280840	383306	508080	657359
	14	N_{PT}	0	1	680	4495	14190	32509	62196	105995	166650	246905	349504	477191	632710	820105
	15	N_{PT}	0	1	816	5456	17296	39711	76076	129766	204156	302621	428536	585276	776216	1003316
	16	N_{PT}	0	1	969	6545	20825	47905	91881	156849	246905	366145	518665	708561	934343	1212546
	17	N_{PT}	0	1	1140	7770	24804	57155	109736	187460	295240	437989	620620	847107	1128205	1464646
	18	N_{PT}	0	1	1330	9139	29260	67525	129766	221815	349504	518665	735130	1003316	1329966	1733333
	19	N_{PT}	0	1	1540	10660	34220	79079	152096	260130	410040	608685	862903	1179407	1564153	2029478
	20	N_{PT}	0	1	1771	12341	39711	91881	176851	302621	477191	708561	1003316	1374788	1827485	2358722

Таблиця 4

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ для i=4$i = 1; s = 2 \div 20$

i	*S*	*m*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
4	2	N_{PT}	0	0	1	15	70	210	495	1001	1820	3060	4845	7315	10626	14950
	3	N_{PT}	0	0	1	35	210	715	1820	3876	7315	12650	20475	31465	46376	66045
	4	N_{PT}	0	0	1	70	495	1820	4845	10626	20475	35960	58905	91390	135751	194580
	5	N_{PT}	0	0	1	126	1001	3876	10626	23751	46376	82251	135751	211876	316251	455126
	6	N_{PT}	0	0	1	210	1820	7315	20475	46376	91390	163185	270725	424270	635376	916895
	7	N_{PT}	0	0	1	330	3060	12650	35960	82251	163185	292825	487635	766480	1150626	1663740
	8	N_{PT}	0	0	1	495	4845	20475	58905	135751	270725	487635	814385	1282975	1929501	2794155
	9	N_{PT}	0	0	1	715	7315	31465	91390	211876	424270	766480	1282975	2024785	3049501	4421275
	10	N_{PT}	0	0	1	1001	10626	46376	135751	316251	635376	1150626	1929501	3049501	4598126	6672876
	11	N_{PT}	0	0	1	1365	14950	66045	194580	455126	916895	1663740	2794155	4421275	6672876	9691375
	12	N_{PT}	0	0	1	1820	20475	91390	270725	635376	1282975	2331890	3921225	6210820	9381251	13633830
	13	N_{PT}	0	0	1	2380	27405	123410	367290	864501	1749060	3183545	5359095	8495410	12840751	18671940
	14	N_{PT}	0	0	1	3060	35960	163185	487635	1150626	2331890	4249575	7160245	11358880	17178876	24992045
	15	N_{PT}	0	0	1	3876	46376	211876	635376	1502501	3049501	5563251	9381251	14891626	22533126	32795126
	16	N_{PT}	0	0	1	4845	58905	270725	814385	1929501	3921225	7160245	12082785	19190605	29051001	42297979
	17	N_{PT}	0	0	1	5985	73815	341055	1028790	2441626	4967690	9078630	15329615	24359335	36845730	53904428
	18	N_{PT}	0	0	1	7315	91390	424270	1282975	3049501	6210820	11358880	19190605	30507895	46227197	67340067
	19	N_{PT}	0	0	1	8855	111930	521855	1581580	3764376	7673835	14043870	23738715	37634408	57248622	83498677
	20	N_{PT}	0	0	1	10626	135751	635376	1929501	4598126	9381251	17178876	29051001	46227197	69796954	$1{,}02 \cdot 10^8$

Таблиця 5

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ **для i=5**$i = 1; s = 2 \div 20$

i	S	m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
5	2	N_{PT}	0	0	0	1	21	126	462	1287	3003	6188	11628	20349	33649	53130
	3	N_{PT}	0	0	0	1	56	462	2002	6188	15504	33649	65780	118755	201376	324632
	4	N_{PT}	0	0	0	1	126	1287	6188	20349	53130	118755	237336	435897	749398	1221759
	5	N_{PT}	0	0	0	1	252	3003	15504	53130	142506	324632	658008	1221759	2118760	3478761
	6	N_{PT}	0	0	0	1	462	6188	33649	118755	324632	749398	1533939	2869685	5006386	8259888
	7	N_{PT}	0	0	0	1	792	11628	65780	237336	658008	1533939	3162510	5949147	10424128	17259390
	8	N_{PT}	0	0	0	1	1287	20349	118755	435897	1221759	2869685	5949147	11238513	19757815	32801517
	9	N_{PT}	0	0	0	1	2002	33649	201376	749398	2118760	5006386	10424128	19757815	34826302	57940519
	10	N_{PT}	0	0	0	1	3003	53130	324632	1221759	3478761	8259888	17259390	32801517	57940519	96560646
	11	N_{PT}	0	0	0	1	4368	80730	501942	1906884	5461512	13019909	27285336	51971283	91962520	$1{,}53 \cdot 10^8$
	12	N_{PT}	0	0	0	1	6188	118755	749398	2869685	8259888	19757815	41507642	79208745	$1{,}4 \cdot 10^8$	$2{,}35 \cdot 10^8$
	13	N_{PT}	0	0	0	1	8568	169911	1086008	4187106	12103014	29034396	61124064	$1{,}17 \cdot 10^8$	$2{,}07 \cdot 10^8$	$3{,}47 \cdot 10^8$
	14	N_{PT}	0	0	0	1	11628	237336	1533939	5949147	17259390	41507642	87541245	$1{,}68 \cdot 10^8$	$2{,}98 \cdot 10^8$	$4{,}98 \cdot 10^8$
	15	N_{PT}	0	0	0	1	15504	324632	2118760	8259888	24040016	57940519	$1{,}22 \cdot 10^8$	$2{,}35 \cdot 10^8$	$4{,}17 \cdot 10^8$	$6{,}99 \cdot 10^8$
	16	N_{PT}	0	0	0	1	20349	435897	2869685	11238513	32801517	79208745	$1{,}68 \cdot 10^8$	$3{,}21 \cdot 10^8$	$5{,}72 \cdot 10^8$	$9{,}59 \cdot 10^8$
	17	N_{PT}	0	0	0	1	26334	575757	3819816	15020334	43949268	$1{,}06 \cdot 10^8$	$2{,}25 \cdot 10^8$	$4{,}32 \cdot 10^8$	$7{,}7 \cdot 10^8$	$1{,}28 \cdot 10^8$
	18	N_{PT}	0	0	0	1	33649	749398	5006386	19757815	57940519	$1{,}4 \cdot 10^8$	$2{,}98 \cdot 10^8$	$5{,}72 \cdot 10^8$	$1{,}02 \cdot 10^8$	$1{,}7 \cdot 10^8$
	19	N_{PT}	0	0	0	1	42504	962598	6471002	25621596	75287520	$1{,}83 \cdot 10^8$	$3{,}88 \cdot 10^8$	$7{,}45 \cdot 10^8$	$1{,}33 \cdot 10^8$	$2{,}23 \cdot 10^8$
	20	N_{PT}	0	0	0	1	53130	1221759	8259888	32801517	96560646	$2{,}35 \cdot 10^8$	$4{,}98 \cdot 10^8$	$9{,}59 \cdot 10^8$	$1{,}7 \cdot 10^8$	$2{,}87 \cdot 10^8$

Таблиця 6

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ **для i=6**$i = 1; s = 2 \div 20$

i	S	m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
6	2	N_{PT}	0	0	0	0	1	28	210	924	3003	8008	18564	38760	74613	134596
	3	N_{PT}	0	0	0	0	1	84	924	5005	18564	54264	134596	296910	593775	1107568
	4	N_{PT}	0	0	0	0	1	210	3003	18564	74613	230230	593775	1344904	2760681	5245786
	5	N_{PT}	0	0	0	0	1	462	8008	54264	230230	736281	1947792	4496388	9366819	18009460
	6	N_{PT}	0	0	0	0	1	924	18564	134596	593775	1947792	5245786	12271512	25827165	50063860
	7	N_{PT}	0	0	0	0	1	1716	38760	296010	1344904	4496388	12271512	28989675	61474519	$1{,}2 \cdot 10^8$
	8	N_{PT}	0	0	0	0	1	3003	74613	593775	2760681	9366819	25827165	61474519	$1{,}31 \cdot 10^8$	$2{,}57 \cdot 10^8$
	9	N_{PT}	0	0	0	0	1	5005	134596	1107568	5245786	18009460	50063860	$1{,}2 \cdot 10^8$	$2{,}57 \cdot 10^8$	$5{,}05 \cdot 10^8$
	10	N_{PT}	0	0	0	0	1	8008	230220	1947792	9366819	32468436	90858768	$2{,}19 \cdot 10^8$	$4{,}7 \cdot 10^8$	$9{,}27 \cdot 10^8$
	11	N_{PT}	0	0	0	0	1	12376	376740	3262623	15890700	55525372	$1{,}56 \cdot 10^8$	$3{,}77 \cdot 10^8$	$8{,}14 \cdot 10^8$	$1{,}61 \cdot 10^9$
	12	N_{PT}	0	0	0	0	1	18564	593775	5245786	25827165	90858768	$2{,}57 \cdot 10^8$	$6{,}23 \cdot 10^8$	$1{,}35 \cdot 10^9$	$2{,}67 \cdot 10^9$
	13	N_{PT}	0	0	0	0	1	27132	906192	8145060	40475358	$1{,}43 \cdot 10^8$	$4{,}06 \cdot 10^8$	$9{,}88 \cdot 10^8$	$2{,}14 \cdot 10^9$	$4{,}25 \cdot 10^9$
	14	N_{PT}	0	0	0	0	1	38760	1344904	12271512	61474519	$2{,}19 \cdot 10^8$	$6{,}23 \cdot 10^8$	$1{,}52 \cdot 10^9$	$3{,}3 \cdot 10^9$	$6{,}55 \cdot 10^9$
	15	N_{PT}	0	0	0	0	1	54264	1947792	18009460	90858768	$3{,}25 \cdot 10^8$	$9{,}27 \cdot 10^8$	$2{,}26 \cdot 19^8$	$4{,}93 \cdot 10^9$	$9{,}8 \cdot 10^9$
	16	N_{PT}	0	0	0	0	1	74613	2760681	25827165	$1{,}31 \cdot 10^8$	$4{,}7 \cdot 10^8$	$1{,}35 \cdot 10^9$	$3{,}3 \cdot 19^8$	$7{,}18 \cdot 10^9$	$1{,}43 \cdot 10^{10}$
	17	N_{PT}	0	0	0	0	1	100947	3838380	36288252	$1{,}85 \cdot 10^8$	$6{,}67 \cdot 10^8$	$1{,}91 \cdot 10^9$	$4{,}69 \cdot 10^9$	$1{,}02 \cdot 10^{10}$	$2{,}04 \cdot 10^{10}$
	18	N_{PT}	0	0	0	0	1	134596	5245786	50063860	$2{,}57 \cdot 10^8$	$9{,}27 \cdot 10^8$	$2{,}67 \cdot 10^9$	$6{,}55 \cdot 10^9$	$1{,}43 \cdot 10^{10}$	$2{,}85 \cdot 10^{10}$
	19	N_{PT}	0	0	0	0	1	177100	7059052	67945521	$3{,}5 \cdot 10^8$	$1{,}27 \cdot 10^9$	$3{,}65 \cdot 10^9$	$8{,}98 \cdot 10^9$	$1{,}96 \cdot 10^{10}$	$3{,}92 \cdot 10^{10}$
	20	N_{PT}	0	0	0	0	1	230230	9366819	90858768	$4{,}7 \cdot 10^8$	$1{,}71 \cdot 10^9$	$4{,}93 \cdot 10^9$	$1{,}21 \cdot 10^{10}$	$2{,}65 \cdot 10^{10}$	$5{,}3 \cdot 10^{10}$

Таблиця 7

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ **для i=7**$i = 1; s = 2 \div 20$

i	S	m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
7	2	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	36	330	1716	6435	19448	50388	116280	245157
	3	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	120	1716	11440	50388	170544	480700	1184040	2629575
	4	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	330	6434	50388	245157	888030	2629575	6724520	15380937
	5	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	792	19448	170544	888030	3365856	10295472	26978328	62891499
	6	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	1716	50388	480700	2629575	10295472	32224114	85900584	$2{,}03 \cdot 10^8$
	7	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	3432	116280	1184040	6724520	26978328	85900584	$2{,}32 \cdot 10^8$	$5{,}53 \cdot 10^8$
	8	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	6435	245157	2629575	15380937	62891499	$2{,}03 \cdot 10^8$	$5{,}53 \cdot 10^8$	$1{,}33 \cdot 10^9$
	9	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	11440	480700	5379616	32224114	$1{,}34 \cdot 10^8$	$4{,}36 \cdot 10^8$	$1{,}2 \cdot 10^9$	$2{,}9 \cdot 10^9$
	10	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	19448	888030	10295472	62891499	$2{,}64 \cdot 10^8$	$8{,}7 \cdot 10^8$	$2{,}4 \cdot 10^9$	$5{,}84 \cdot 10^9$
	11	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	31824	1560780	18643560	$1{,}16 \cdot 10^8$	$4{,}92 \cdot 10^8$	$1{,}63 \cdot 10^9$	$4{,}53 \cdot 10^9$	$1{,}11 \cdot 10^{10}$
	12	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	50388	2629275	32224114	$2{,}03 \cdot 10^8$	$8{,}7 \cdot 10^8$	$2{,}9 \cdot 10^9$	$8{,}09 \cdot 10^9$	$1{,}98 \cdot 10^{10}$
	13	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	77520	4272048	53524680	$3{,}41 \cdot 10^8$	$1{,}47 \cdot 10^9$	$4{,}94 \cdot 10^9$	$1{,}38 \cdot 10^{10}$	$3{,}4 \cdot 10^{10}$
	14	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	116280	6724520	85900584	$5{,}53 \cdot 10^8$	$2{,}4 \cdot 10^9$	$8{,}09 \cdot 10^9$	$2{,}28 \cdot 10^{10}$	$5{,}6 \cdot 10^{10}$
	15	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	170544	10295472	$1{,}34 \cdot 10^8$	$8{,}7 \cdot 10^8$	$3{,}8 \cdot 10^9$	$1{,}28 \cdot 10^{10}$	$3{,}62 \cdot 10^{10}$	$8{,}94 \cdot 10^{10}$
	16	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	245157	15380937	$2{,}03 \cdot 10^8$	$1{,}33 \cdot 10^9$	$5{,}84 \cdot 10^9$	$1{,}98 \cdot 10^{10}$	$5{,}6 \cdot 10^{10}$	$1{,}38 \cdot 10^{11}$
	17	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	346104	22481940	$3{,}01 \cdot 10^8$	$1{,}98 \cdot 10^9$	$8{,}76 \cdot 10^9$	$2{,}98 \cdot 10^{10}$	$8{,}44 \cdot 10^{10}$	$2{,}09 \cdot 10^{11}$
	18	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	480700	32224114	$4{,}36 \cdot 10^8$	$2{,}9 \cdot 10^9$	$1{,}28 \cdot 10^{10}$	$4{,}38 \cdot 10^{10}$	$1{,}24 \cdot 10^{11}$	$3{,}08 \cdot 10^{11}$
	19	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	657800	45379620	$6{,}21 \cdot 10^8$	$4{,}15 \cdot 10^9$	$1{,}85 \cdot 10^{10}$	$6{,}31 \cdot 10^{10}$	$1{,}8 \cdot 10^{11}$	$4{,}46 \cdot 10^{11}$
	20	N_{PT}	0	0	0	0	0	1	888030	62891499	$8{,}7 \cdot 10^8$	$5{,}84 \cdot 10^9$	$2{,}61 \cdot 10^{10}$	$8{,}94 \cdot 10^{10}$	$2{,}55 \cdot 10^{11}$	$6{,}33 \cdot 10^{11}$

Таблиця 8

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ **для i=8**$i = 1; s = 2 \div 20$

i	*S*	*m*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		2^m	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
8	2	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	45	495	3003	12870	43758	125970	319770
	3	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	165	3003	24310	125970	490314	1562275	4292145
	4	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	495	12870	125970	735471	3108105	10518300	30260340
	5	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	1287	43758	490314	3108104	13884156	48903492	$1{,}45\cdot10^{8}$
	6	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	3003	125970	1562275	10518300	48903492	$1{,}77\cdot10^{8}$	$5{,}37\cdot10^{8}$
	7	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	6435	319770	4292145	30260340	$1{,}45\cdot10^{8}$	$5{,}37\cdot10^{8}$	$1{,}65\cdot10^{9}$
	8	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	12870	735471	10518300	76904685	$3{,}77\cdot10^{8}$	$1{,}42\cdot10^{9}$	$4{,}43\cdot10^{9}$
	9	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	24310	1562275	23535820	$1{,}77\cdot10^{8}$	$8{,}86\cdot10^{8}$	$3{,}38\cdot10^{9}$	$1{,}06\cdot10^{10}$
	10	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	43758	3108105	48903492	$3{,}77\cdot10^{8}$	$1{,}92\cdot10^{9}$	$7{,}39\cdot10^{9}$	$2{,}34\cdot10^{10}$
	11	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	75582	5852925	95548245	$7{,}53\cdot10^{8}$	$3{,}87\cdot10^{9}$	$1{,}51\cdot10^{10}$	$4{,}81\cdot10^{10}$
	12	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	125970	10518300	$1{,}77\cdot10^{8}$	$1{,}42\cdot10^{9}$	$7{,}39\cdot10^{9}$	$2{,}9\cdot10^{10}$	$9{,}31\cdot10^{10}$
	13	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	203490	18156204	$3{,}14\cdot10^{8}$	$2{,}56\cdot10^{9}$	$1{,}34\cdot10^{10}$	$5{,}31\cdot10^{10}$	$1{,}71\cdot10^{11}$
	14	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	319770	30260340	$5{,}37\cdot10^{8}$	$4{,}43\cdot10^{9}$	$2{,}34\cdot10^{10}$	$9{,}31\cdot10^{10}$	$3{,}02\cdot10^{11}$
	15	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	490314	48903492	$8{,}86\cdot10^{8}$	$7{,}39\cdot10^{9}$	$3{,}94\cdot10^{10}$	$1{,}57\cdot10^{11}$	$5{,}12\cdot10^{11}$
	16	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	735471	76904685	$1{,}42\cdot10^{9}$	$1{,}2\cdot10^{10}$	$6{,}43\cdot10^{10}$	$2{,}58\cdot10^{11}$	$8{,}4\cdot10^{11}$
	17	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	1081575	$1{,}18\cdot10^{8}$	$2{,}22\cdot10^{9}$	$1{,}89\cdot10^{10}$	$1{,}02\cdot10^{11}$	$4{,}1\cdot10^{11}$	$1{,}34\cdot10^{12}$
	18	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	1562275	$1{,}77\cdot10^{8}$	$3{,}38\cdot10^{9}$	$2{,}9\cdot10^{10}$	$1{,}57\cdot10^{11}$	$6{,}35\cdot10^{11}$	$2{,}08\cdot10^{12}$
	19	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	2220075	$2{,}61\cdot10^{8}$	$5{,}05\cdot10^{9}$	$4{,}36\cdot10^{10}$	$2{,}38\cdot10^{11}$	$9{,}63\cdot10^{11}$	$3{,}17\cdot10^{12}$
	20	N_{PT}	0	0	0	0	0	0	1	3108105	$3{,}77\cdot10^{8}$	$7{,}39\cdot10^{9}$	$6{,}43\cdot10^{10}$	$3{,}52\cdot10^{11}$	$1{,}43\cdot10^{12}$	$4{,}71\cdot10^{12}$

$$H_{BT} = -\left[P_B \cdot \log_2 P_B + (1-P_B) \cdot \log_2 \frac{1-P_B}{N_{PT}-1} \right], \tag{3}$$

де $P_в\ P_B$ – ймовірність вірного приймання сигнальної конструкції з *i* –переходами:

$$P_B = \left[2\Phi \cdot (\frac{\Delta_{\text{ОПТ}}}{2 \cdot \sigma_{\text{К}}}) \right]^{\bar{i}}, \tag{4}$$

де Δопт = (3,8...5,5); Φ(*x*) – інтеграл імовірностей:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^X e^{\frac{-Z^2}{2}} dz\,. \tag{5}$$

Середнє число моментів модуляції дорівнює:

$$\bar{i} = \sum_{i=1}^{m} P\left[N_P(i)\right] i \qquad P\left[N_P(i)\right] = \frac{N_P}{N_{P_\Sigma}}. \tag{6}$$

Середньоквадратичне відхилення зміщення фронту сигналу на виході каналу:

$$\sigma_K = \frac{4}{h}, \tag{7}$$

де *h* – відношення сигнал/завада, $h=U_c/U_з$.

Граничне значення пропускної здатності каналу зв'язку буде визначатися виразом:

$$C_{\max} = \frac{\log_2 N_{P\sum}}{T_{CK}}, \tag{8}$$

де $N_{\text{р}\Sigma}$ − загальна кількість реалізацій, які використовуються з урахуванням кількості значущих моментів модуляції (*i)*;

$T_{\text{СК}}$ − часовий інтервал сигнальної конструкції в числі найквістових елементів:

$$T_{CK} = m \cdot t_0, \tag{9}$$

де t_0 = 0,9575с.

Результати досліджень подані в таблицях 9 та 10.

Таблиця 9

Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s, m та h = 8

S	*m*			H_{BT}			C_m		
	7	8	9						
2	126	462	1287	0,000722	0,00078	0,000825	0,9966512	1,106371	1,147663
3	462	2002	6188	0,00078	0,000845	0,000895	1,2644242	1,370798	1,399374
4	1287	6188	20349	0,000825	0,000895	0,000948	1,4755673	1,574295	1,590191
5	3003	15504	53130	0,000863	0,000936	0,000991	1,6501894	1,739927	1,744028
6	6188	33649	118755	0,000895	0,000971	0,001027	1,7991946	1,879663	1,872956
7	11628	65780	237336	0,000923	0,001001	0,001058	1,9291988	2,000545	1,983946
8	20349	118755	435897	0,000948	0,001027	0,001085	2,0445317	2,107075	2,081394
9	33649	201376	749398	0,000971	0,00105	0,001109	2,1481865	2,20231	2,168252
						Cmax	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 10

Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s, m та h = 5

S	*m*			H_{BT}			C_m		
	7	8	9						
2	126	462	1287	0,309447	0,351426	0,384424	0,9525476	1,06254	1,105041
3	462	2002	6188	0,351426	0,398645	0,434953	1,2143319	1,321073	1,351145
4	1287	6188	20349	0,384424	0,434953	0,473247	1,4207675	1,520038	1,537714
5	3003	15504	53130	0,411692	0,4645	0,504118	1,5914995	1,681982	1,688125
6	6188	33649	118755	0,434953	0,489426	0,52999	1,7371863	1,818606	1,814182
7	11628	65780	237336	0,455246	0,510988	0,552262	1,8642956	1,936797	1,922701
8	20349	118755	435897	0,473247	0,52999	0,571816	1,9770604	2,040955	2,017979
9	33649	201376	749398	0,489426	0,546977	0,589245	2,0784072	2,134069	2,102903
						Cmax	2,4173169	2,38246	2,311689

На рис. 2 та рис. 3 наведено залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів як функцій *s* з даних таблиць 9 та 10 (криві 1…3 для *h* = 8 і *m* = 9,8,7 відповідно, криві 4…6 для *h* = 5 і *m* = 9,8,7 відповідно).

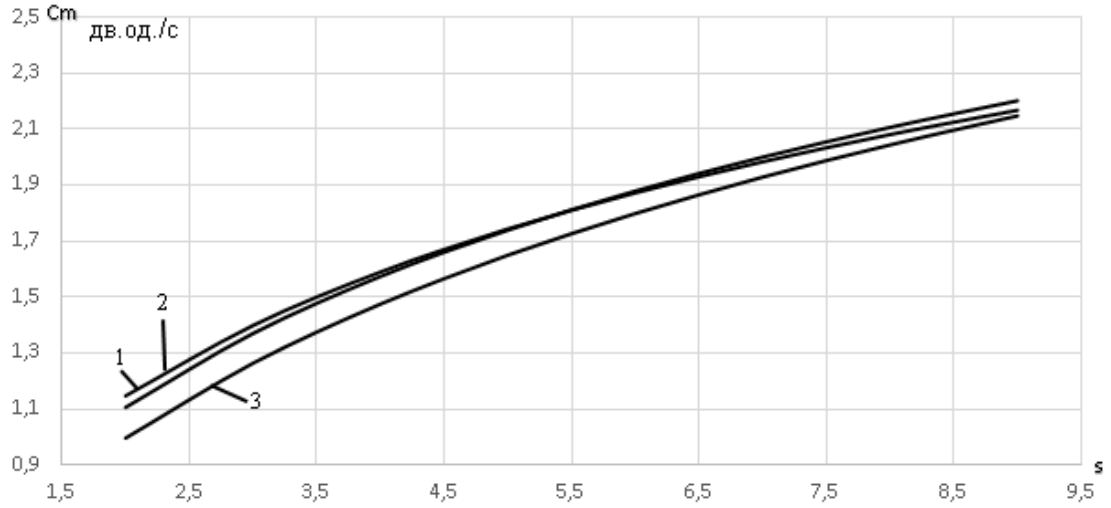


Рис. 2. Залежності пропускної здатності каналу *Ci* = *f* (s) при *h* = 8, *m* = 9,8,7

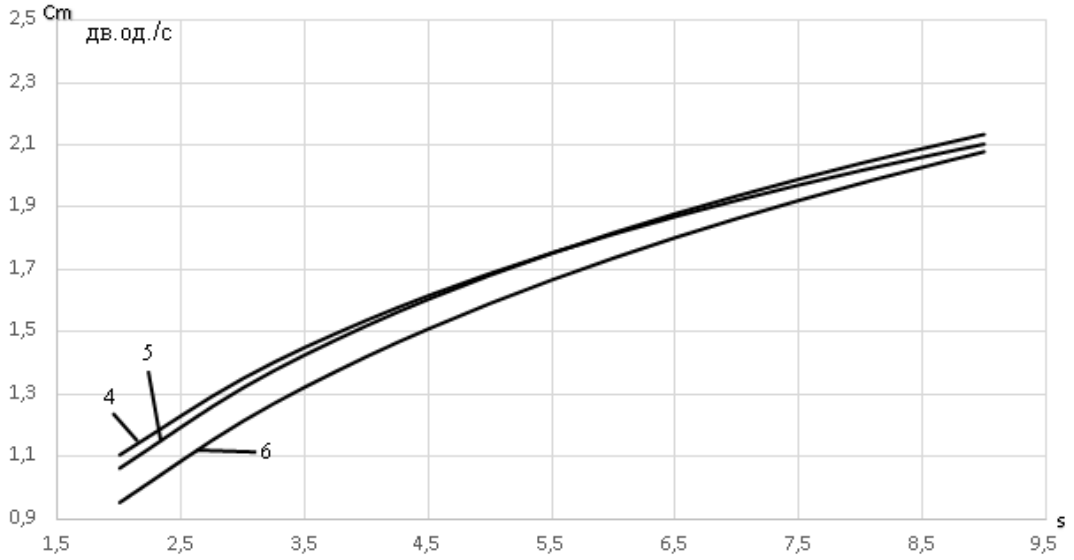


Рис. 3. Залежності пропускної здатності каналу *Ci* = *f* (*s*) при *h* = 5, *m* = 9,8,7

Висновки

1. З наведеної вище інформації слід зробити висновок, що у двійковому каналі на *m*-елементному інтервалі часу, за рахунок значення Δ(*s*) можливо отримати одне й те саме число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій на різних інтервалах часу *T*ск (рис. 1).

2. При збільшенні *S* з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При *s* = 2 та збільшенні m з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 15,2%. При *s* = 9 та збільшенні *m* з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 0,93% (відношення сигнал/завада *h* = 8).

3. При збільшенні *S* з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При *s* = 2 та збільшенні *m* з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 16%. При *s* = 9 та збільшенні m з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 0,2%(відношення сигнал/завада *h* = 5).

4. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку (C_{max}=2,417 дв.од./с) досягається за умови, що t_0= 0.9575с, *m* =7, $N_{p\Sigma}$ = 992687.

Література

1. Захарченко М.В. Системи передавання даних. Т. 1: Завадостійке З-38 кодування : підручник [для студентів вищих технічних навчальних закладів] / М.В. Захарченко. – Одеса : Фенікс, 2009. – 448 с.

2. Захарченко М.В. Системи передавання даних. Т. 1: Ефективність блокового кодування / [Захарченко М.В., Кільдішев В.Й., Мартинова О.М., Ільїн Д.Ю., Трінтіна Н.А.]. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 488 с.

3. Захарченко Н.В. Информационные параметры позиционных и таймерных кодов. Том 1. Информационные параметры позиционных кодов : учеб. пособ. / [Н.В. Захарченко, С.М. Горохов, А.В. Кочетков]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2018. – 212 с.

References

1. Zakharchenko M.V. Systemy peredavannia danykh. T. 1: Zavadostiike Z-38 koduvannia : pidruchnyk [dlia studentiv vyshchykh tekhnichnykh navchalnykh zakladiv] / M.V. Zakharchenko. – Odesa : Feniks, 2009. – 448 s.

2. Zakharchenko M.V. Systemy peredavannia danykh. T. 1: Efektyvnist blokovoho koduvannia / [Zakharchenko M.V., Kildishev V.I., Martynova O.M., Ilin D.Iu., Trintina N.A.]. – Odesa : ONAZ im. O.S. Popova, 2014. – 488 s.

3. Zaharchenko N.V. Informacionnye parametry pozicionnyh i tajmernyh kodov. Tom 1. Informacionnye parametry pozicionnyh kodov : ucheb. posob. / [N.V. Zaharchenko, S.M. Gorohov, A.V. Kochetkov]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2018. – 212 s.

Надійшла / Paper received : 07.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-21-27
УДК 621.317.73

Ю.В. ФОРКУН, Д.А. МАКАРИШКІН, В.В. БЕРЕЗОВЧУК, А.М. ПАЛЕВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ КЕРУВАННЯ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В статті наведено дослідження методів вимірювання дальності, які здійснюються автоматизованими системами керування літальними апаратами. Представлені результати дослідження встановлюють, що методи вимірювання дальності для автоматизації процесів керування літальними апаратами відрізняються між собою та характеризуються великою кількістю різноманітних параметрів, в зв'язку з чим не існує одного універсального методу та засобу для їх виявлення. Для виявлення цілей за допомогою систем автоматизації процесів керування літальними апаратами, що ґрунтуються на використанні коливальних процесів по первинному інформативному параметру виділяють такі методи вимірювання дальності, як амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, частотно-фазовий, часовий та резонансний.

***Ключові слова**: автоматизована система керування літальними апаратами, методи вимірювання дальності, радіолокатор, радіолокаційна станція.*

Y.V. FORKUN, D.A. MAKARYSHKIN, V.V. BEREZOVCHUK, A.M. PALEVSKII
Khmelnytskyi National University

METHODS OF DETECTION AND DETERMINATION OF RANGE BY AUTOMATED AIRCRAFT CONTROL SYSTEMS

The paper presents a study of methods for measuring range, which are carried out by automated aircraft control systems. The results of the study show that the methods of measuring range for automation of aircraft control processes differ from each other and are characterized by a large number of different parameters, so there is no one universal method and means for their detection. The analysis of methods for measuring the range of automation systems for aircraft control processes showed that electromagnetic fields are used to identify targets, which provide information about the characteristics of the studied control objects. To identify targets with the help of aircraft control automation systems based on the use of oscillating processes on the primary informative parameter, such methods of measuring range as amplitude, phase, amplitude-phase, frequency-phase, time and resonance are distinguished. According to the problem different methods of distance measurement are used. A significant disadvantage of most methods is the low measurement accuracy, and only the multiscale phase method has a higher measurement accuracy. The only significant disadvantage of the phase method is that due to the overlap of signals reflected from multiple objects, cosine signals of the same frequency are superimposed, so there is a complete lack of resolution. These mathematical transformations establish how to find the phase shift between two harmonic signals reflected from two measurement targets, but to find the distances it is necessary to know the phase shift of each signal.

***Key words:** automated aircraft control system, range measurement methods, radar, radar station.*

Вступ

Будь-який радіолокатор систем автоматизації процесів керування літальними апаратами працює в трьох режимах: пасивний, активний та вибір рухомих цілей. Пасивний режим означає, що сигнал, що приймається радіолокаційним приймачем системи автоматизації процесів керування літальними апаратами, формується в результаті відбиття (розсіювання) цілі електромагнітного коливання, що випромінюється радіолокаційною антеною і випромінюється до цілі (рис. 1) [1].

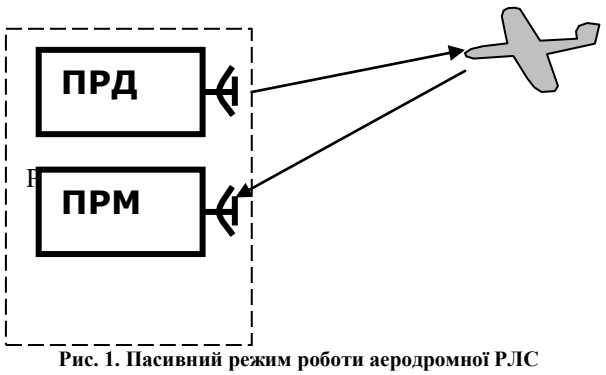


Рис. 1. Пасивний режим роботи аеродромної РЛС

На відміну від пасивного режиму, в активному режимі передавач основного каналу радіолокатора систем автоматизації процесів керування літальними апаратами не генерує жодного імпульсу, але генерує пакет кодів, який є запитом до реагуючого апарату літака. У приймачі основного каналу парні відштовхувальні імпульси декодуються, перетворюються в єдиний імпульс і потім подаються в звичайний пасивний блок (рис. 2).

Робота пристрою передачі систем автоматизації процесів керування літальними апаратами основного каналу в режимі SRC подібна до роботи в пасивному режимі. Різниця полягає у зміні швидкості повторення та тривалості імпульсів модуляції та детектування. Метод когерентного імпульсу з внутрішньою псевдокогерентністю використовується для вибору рухомих цілей. У відповідному блоці реалізується оцінка зміни фазового значення прийнятого сигналу протягом періоду повторення імпульсу. Однак режим SRC не може виміряти радіальну швидкість літака, оскільки доплерівський зсув протягом тривалості імпульсу виявлення практично неможливо виміряти з необхідною точністю.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Всі відомі системи радіолокаційного спостереження в автоматизації процесів керування літальними апаратами у районах аеропортів призначені для вимірювання радіальної швидкості літаків. Це їх істотний недолік, оскільки час між виявленнями в одному напрямку становить 4-6 секунд. У цей період, коли

швидкість літака становить 400 км/год, літак може змінити своє положення на 444–667 м, а коли швидкість літака 500 км/год, його можна змінити на 555–833 м. В обох випадках відстань, яку пролітає літак, дуже велика, і якщо два літаки перебувають на цих відстанях, не знаючи векторного сегмента швидкості літака, неможливо передбачити можливість небезпечної ситуації. Більше того, незважаючи на відповідну систему попередження про радіо зіткнення на борту літака, додатковий контроль диспетчера може бути корисним.

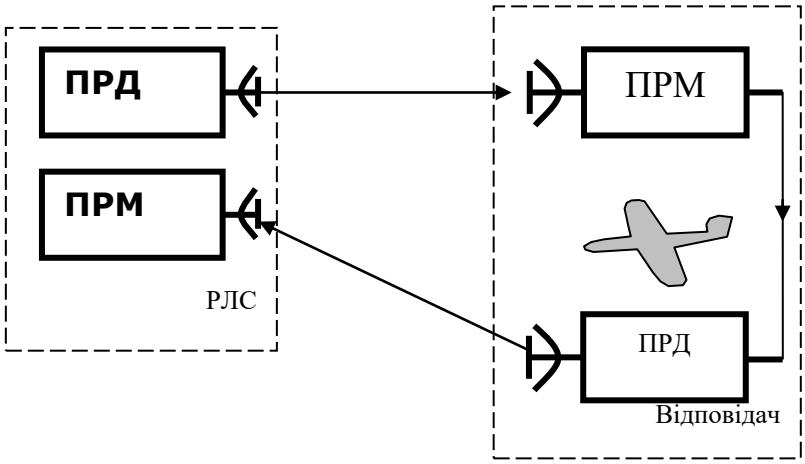


Рис. 2. Активний режим роботи аеродромної РЛС

Через очевидні помилки вимірювання частоти блок вимірювання зсуву частоти Доплера не використовується при побудові радарів для обстеження аеропортів. Отже, оскільки тривалість зондового імпульсу становить одиничні порядки величини або від одного до декількох десятків нс, несуча частота становить приблизно один-два ГГц. У цьому випадку похибка вимірювання частоти традиційними методами велика [34].

Поєднуючи вищезазначену ситуацію, завданнями для подальшої роботи є:

1. Аналіз відомих методів далекомірів, що використовуються в радарах систем автоматизації процесів керування літальними апаратами, приділяючи особливу увагу методу побудови далекомірів.

2. Вивчіть точність та роздільну здатність передових методів для вимірювання координат.

3. Розробити імітаційні математичні моделі, алгоритми комп'ютерних програм та математично моделювати процес визначення координат у разі визначення цілей та характеристик далекомірної системи та її алгоритму.

4. Використати вимірювання відстані щоб розробити структурну схему радіолокаційної системи та автоматизованої системи керування літальними апаратами.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Радіолокатори систем автоматизації процесів керування літальними апаратами у пасивному режимі виконують дві основні функції: вимірювання відстані до та вимірювання азимуту, і якщо вимірювання азимуту залежить від ширини діаграми спрямованості випромінюючої антени, швидкості повороту антени тощо, тоді вимірювання відстані до залежить від застосовуваних методів дальнометрії.

У всіх радіодальномірах відстань до до цілі R визначається часом запізнення у часі відбитого сигналу: $t_R = 2R/c$, де c – швидкість проходження радіохвилі.

Вимірявши цей час, можна визначити відстань до цілі $R = 0,5ct_R$ з миттєвою відносною похибкою:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta t_R}{t_R}. \tag{1}$$

Припускаючи, що $\frac{\Delta R}{R}$ та Δt_R випадкові і незалежні величини, знаходять відносну точність радіодальноміра:

$$\frac{\sigma_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{t_R}}{t_R}\right)^2}. \tag{2}$$

Дисперсія σ_c^2 обумовлена точністю, з якою відома швидкість проходження радіохвилі і її непостійністю вздовж траси. Точність визначення швидкості радіохвилі c складає $\sigma_c/c = 10^{-9}$. Але в атмосфері $\sigma_c/c = 10^{-4}\ldots10^{-6}$, тому навіть за відсутності апаратурних помилок гранична точність вимір відстані до залежить від того, наскільки точно відоме значення c, а також можливості врахування

Фазовий метод далекометрії дозволяє вимірювати відстань до на несущій значенню частоти ω_0. [3] Зондувальним сигналом є неперервне гармонійне коливання яке має вигляд:

$$s_1(t) = U_{m1}\cos\phi_1 = U_{m1}\cos\left(\Omega_m t + \phi_{01}\right), \tag{3}$$

де Ω_m – кутова частота сигналу масштабної частоти, в найпростішому разі $\Omega_m = \omega_0$.

Відбитий сигнали має вигляд:

$$s_2(t) = U_{m2}\cos\varphi_2 = U_{m2}\cos\left(\Omega_m(t-t_R) + \varphi_{01} + \varphi_{an} + \varphi_{\text{відб}}\right), \quad (4)$$

де U_{m1}, U_{m2} – значення амплітуди сигналів;

φ_1, φ_2 – миттєві значення фази сигналів;

φ_{01} – початкове значення фази;

φ_{an} – зсув фази в апаратурі радіодальноміра;

$\varphi_{\text{відб}}$ – зсув значень фази при відбитті сигналу від об'єкту.

За допомогою фазометра визначають фазову різницю φ_Δ опорного (зондувального) і відбитого сигналів:

$$R = \frac{c\left(\varphi_\Delta + \varphi_{an} + \varphi_{\text{відб}}\right)}{2\Omega_m}. \quad (5)$$

Зсув фаз φ_{an} можна виключити шляхом калібрування, вимірюючи зсув фаз прямого проходження сигналу через тракти передавача і приймача. Зміни значень фази при відбитті сигналу $\varphi_{\text{відб}}$ сильно означають на точність, тому як при відбитті від металів і діелектриків $\varphi_{\text{відб}}$ змінюється на 180°. Тому зазвичай обирають $\Omega_m < \omega_0$ і працюють в режимі модуляції сигналу радіочастоти. В такому разі, величиною $\varphi_{\text{відб}}$ можна знехтувати і рівняння виміру приймає вигляд [2, 3]:

$$R = \frac{c}{2\Omega_m}\varphi_\Delta = M_\varphi \varphi_\Delta, \quad (6)$$

де $M_\varphi = \frac{c}{2\Omega_m} = \frac{\lambda}{4\pi}$ – масштабний коефіцієнт ($\lambda = \frac{c}{F_m}$).

Точність виміру відстані до фазовим способом має залежність:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta M_\varphi}{M_\varphi} + \frac{\Delta\varphi_\Delta}{\varphi_\Delta}, \quad (7)$$

враховуючи незалежність ΔM_φ і $\Delta\varphi_\Delta$:

$$\sigma_R = \sqrt{\varphi_\Delta^2\sigma_M^2 + M_\varphi^2\sigma_\varphi^2}, \quad (8)$$

де σ_M^2 і σ_φ^2 – дисперсії зміни масштабного коефіцієнту і зміни значень фази відповідно.

Багатошкальні методи в основному застосовують в радіолокації, радіонавігації, геодезії. Багатошкальний метод полягає в тому, що з його допомогою додаткового вимір на грубішій шкалі, що відповідає нижчій значенню частоти тестового сигналу $\omega_н$, визначають число цілих циклів зміни фазового зсуву n. Значення $\omega_н$ повинно забезпечувати однозначний результат вимірювання, тобто задовольнятись умова $\varphi_н = \omega_н\tau_н < 2\pi$; де $\tau_н$ – час затримки сигналу з частотою $\omega_н$; $\varphi_н$ – зсув фаз в межах сигналу з частотою $\omega_н$. Потім визначають результат вимір за виразом:

$$\tau_ф = \frac{\left(n + \varphi_в/2\pi\right)}{f_в}. \quad (9)$$

де $\varphi_в$ – вимірюване значення фазового зсуву $0 \le \varphi_в \le 2\pi$ на заданій значенню частоти $f_в$. Число n краще знайти з умови:

$$n = \left[\frac{\varphi_н\omega_в}{2\pi\omega_н}\right]^+. \quad (10)$$

де $[Y]^+$ – ціла частина числа Y.

Частотні методи виміру відстані до цілей ґрунтуються на використанні неперервного сигналу з частотною модуляцією за симетричним або несиметричним законом. При лінійному законі ЧМ (рис. 3)

через запізнення відбитого сигналу на час t_R, миттєва різниця частоти сигналів випроміненого f_1 і прийнятого f_2 дорівнює $F_б = f_1(t) - f_2(t) = \left(\partial f(t) / \partial t\right) t_R$. Внаслідок того, що передавач і приймач радіолокатора систем автоматизації процесів керування літальними апаратами мають обмежені діапазони частот, на практиці застосовують періодичні закони модуляції ЧМ [3].

Основне рівняння частотного радіолокатора систем автоматизації процесів керування літальними апаратами має вигляд [3]:

$$R = \frac{v_x \cdot F_б}{4\Delta f \cdot F_м}. \quad (11)$$

Структура частотного радіолокатора-висотоміра систем автоматизації процесів керування літальними апаратами представлена на рисунку 4.

Особливістю частотних радіолокаторів систем автоматизації процесів керування літальними апаратами є дискретний характер залежності виміряної відстані до $R_в$ від фактичної $R_ф$. Тому як спектр сигналу биттів складається з частотних компонент кратних значенню частоти модуляції. Тому як найменша частота биттів $F_{бmin} = F_м$, то мінімальна відстань до яку можна виміряти [3]:

$$R_{min} = \frac{v_x}{4\Delta f}. \quad (12)$$

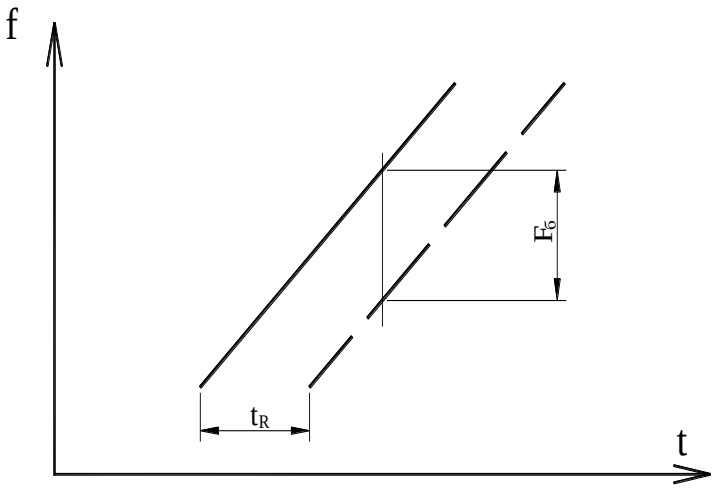


Рис. 3. Принцип частотного методу виміру дальності

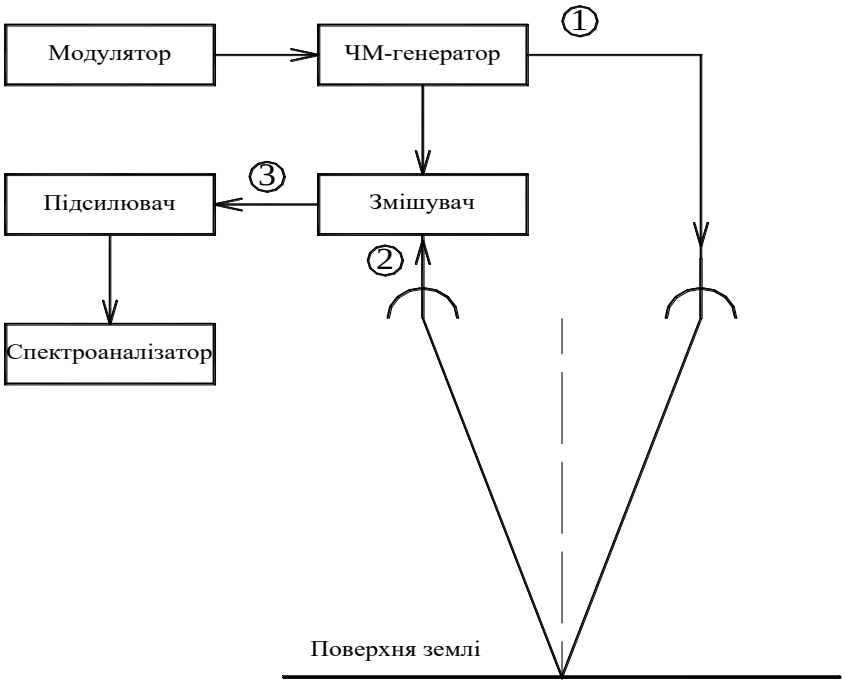


Рис. 4. Структура частотного радіолокатора-висотоміра систем автоматизації процесів керування літальними апаратами

Із зростанням R в спектрі сигналу биттів послідовно з'являються частоти $2F_{\text{м}}$, $3F_{\text{м}}$ і т. д., тому частота биттів змінюється на $F_{\text{м}}$, а відстань до на $\Delta R = R_{\min}$. Отже, для підвищення точності вимір відстані до необхідно збільшувати девіацію частоти Δf.

Точність виміру відстані до частотним способом можна знайти за виразом [4]:

$$\sigma_R = \sqrt{F_6^2 \sigma_M^2 + M_F^2 \sigma_F^2}\ , \tag{13}$$

де $M_F = \dfrac{v_x}{4\Delta f \cdot F_M}$ – масштабний коефіцієнт. В частотних дальномірах значення M_F задають постійним, шляхом стабілізації F_M та Δf. Тоді $\sigma_R = M_F \cdot \sigma_F$.

Серед усіх методів радіолокаційного дослідження часові методи із визначенням часової затримки є найбільш простими [3]. Серед переваг даних методів є наочність та простота визначення дальності. Суть методу полягає у визначенні часової затримки імпульсної зондувальної послідовності, яка є пропорційною подвоєній відстані до об'єкту. Для зондування застосовують імпульсні сигнали тривалістю τ та періодом повторення $T_{\text{П}}$. Враховуючи різну швидкість проходження електромагнітних хвиль в різних середовищах $v_{\text{х}}$ та час затримки сигналу відбитого від *i*-го об'єкту τ_i, відстань до цілей визначається із виразу:

$$D_i = \frac{v_{\text{х}} \tau_i}{2}\ . \tag{14}$$

При проходженні прямокутних імпульсів по колам передавача, середовищу, колам приймача, їхня форма спотворюється і стає відмінною від прямокутної. Це пояснюється змінною їх частотного спектру відповідно до частотних характеристик електронних кіл та середовища, а також частотною дисперсією середовища. Внаслідок цього форма імпульсів із прямокутною перетворюється на форму близьку до Гаусівського імпульсу. В такому разі важко визначити початок імпульсу та його тривалість. Отже, розрізнення імпульсів, що прийшли від різних цілей або цілей можливе якщо можливе розрізнення мінімальної затримки часу $\Delta t_{\min}$. Відомо, що для радіоімпульсів однакової амплітуди, розрізнення за дальністю визначається тривалістю радіоімпульсу $\tau_{0.5}$ на рівні 0.5 від максимальної амплітуди, тобто $\Delta t_{\min} = \tau_{0.5}$, звідки:

$$D_{\min} = \frac{v_{\text{х}} \tau_{0.5}}{2} \tag{15}$$

З метою зменшення габаритів приймальної та передавальної антен, зондувальні імпульси модулюють високочастотним гармонійним сигналом (рис. 5).

Із збільшенням відношення сигнал / шум точність вимірювання часового інтервалу покращується. Для досягнення цієї вимоги потрібно збільшити енергію сигналу виявлення, що, в свою чергу, призводить до необхідності збільшення амплітуди імпульсу, що не завжди можливо. Крім того, чим вища частота сигналу модуляції, тим вища точність і роздільна здатність вимірювання відстані.

Для підвищення точності та роздільної здатності протягом останніх десятиліть використовувались надширокосмугові (НШС) сигнали виявлення. Однією з характеристик цього сигналу є те, що він займає ефективний діапазон частот спектра сигналу. Як правило, спектр частот сигналу НШС займає смугу частот від декількох сотень мегагерц до декількох гігагерц. Такий широкий діапазон частот сигналу дозволяє отримувати інформацію про об'єкти в трьох смугах частот. По-перше, коли довжина хвилі сигналу виявлення перевищує розмір цілі (діапазон частот Релея). По-друге, коли довжина хвилі пропорційна розміру цілі (резонансний діапазон частот). По-третє, коли довжина хвилі менше цільового розміру (високочастотний діапазон) [2, 3].

Інформативні властивості сигналу, що вкладаються у розрізнювальну спроможність виражаються числом спектральних ліній в складі його спектру. Наприклад, для розрізнення двох цілей ($Q = 2$) за допомогою радіосигналу, необхідно мінімум п'ять спектральних ліній [5].

У радарах, радіонавігації, ехолотах систем автоматизації процесів керування літальними апаратами безконтактний метод вимірювання відстані також може бути використаний для визначення координат цілей при виявленні дефектів, діагностиці радіохвиль та неруйнівних випробувань.

Відповідно до вирішуваної задачі використовуються різні методи вимірювання відстані. У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики імпульсного, частотного та фазового методів вимірювання відстані. Суттєвим недоліком більшості методів є низька точність вимірювання, і лише багатомасштабний фазовий метод має вищу точність вимірювання. Єдиним суттєвим недоліком фазового методу є те, що внаслідок накладення сигналів, відбитих від безлічі об'єктів, косинусні сигнали однакової частоти накладаються, тому роздільної здатності повністю бракує.

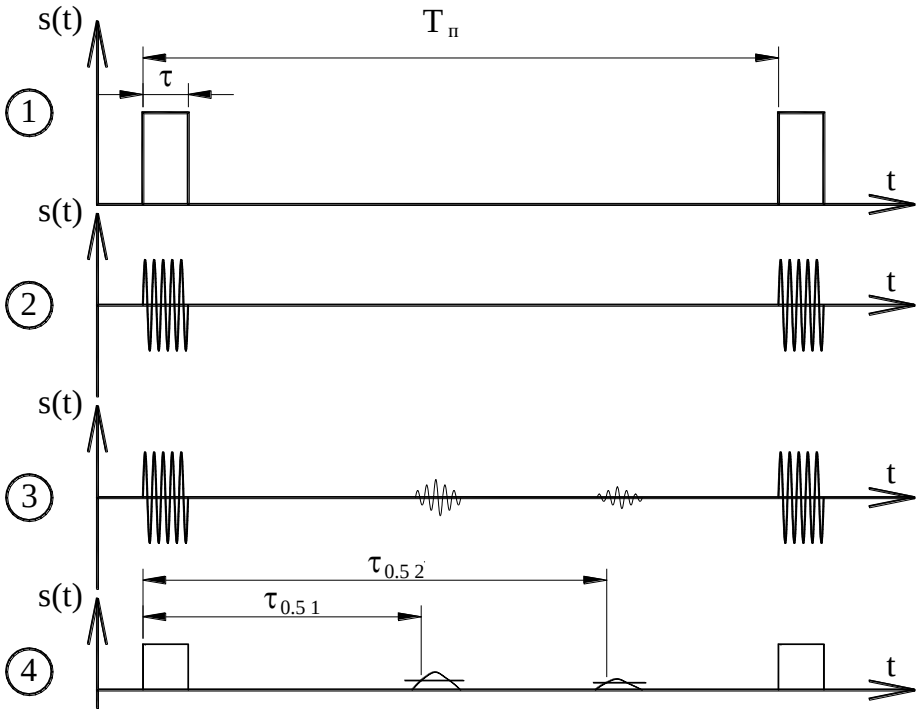


Рис. 5. Імпульсний методи визначення відстані до об'єктів

Відповідно до вирішуваної задачі використовуються різні методи вимірювання відстані. У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики імпульсного, частотного та фазового методів вимірювання відстані. Суттєвим недоліком більшості методів є низька точність вимірювання, і лише багатомасштабний фазовий метод має вищу точність вимірювання. Єдиним суттєвим недоліком фазового методу є те, що внаслідок накладення сигналів, відбитих від безлічі об'єктів, косинусні сигнали однакової частоти накладаються, тому роздільної здатності повністю бракує.

Приведені математичні перетворення встановлюють, як можна знайти зсув фаз між двома, відбитими від двох цілей вимірювання, гармонійними сигналами, але для знаходження відстаней необхідно знати зрушення фаз кожного сигналу. Для цього доцільно застосувати теорему синусів та розв'язати систему рівнянь.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів вимірювання відстані

Метод	Переваги	Недоліки
Часовий	1. Можливість визначення відстаней до довільної кількості об'єктів керування 2. Можливість визначення характеру об'єкта керування	1. Розрізнювальна спроможність залежить від тривалості імпульсу 2. Із зменшенням тривалості імпульсу зростає згасання імпульсу
Частотний	1. Можливість визначення відстаней до довільної кількості об'єктів керування 2. Можливість визначення характеру об'єкта керування 3. Висока точність вимірювання	1. Складність технічної реалізації 2. Необхідність забезпечення лінійності модуляції
Фазовий	1. Визначення характеру об'єкта керування 2. Висока точність вимірювання 3. Використання низькочастотних сигналів	1. Відсутність розрізнювальної спроможності 2. Неможливість визначення характеру неоднорідності

Висновки

1. В результаті дослідження методів вимірювання дальності для автоматизації процесів керування літальними апаратами виявлено, що об'єкти керування відрізняються між собою та характеризуються великою кількістю різноманітних параметрів, в зв'язку з чим не існує одного універсального методу та засобу для їх виявлення.

2. Аналіз методів вимірювання дальності систем автоматизації процесів керування літальними апаратами показав, що для виявлення цілей використовують електромагнітні поля, завдяки яким отримують інформацію про характеристики досліджуваних об'єктів керування.

3. Для виявлення цілей за допомогою систем автоматизації процесів керування літальними

апаратами, що ґрунтуються на використанні коливальних процесів по первинному інформативному параметру можна виділити наступні методи вимірювання дальності: амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, частотно-фазовий, часовий, резонансний.

Література

1. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.
2. Справочник по основам радиолокационной техники / под ред. В.В. Дружинина. – М. : Воениздат, 1987. – 768 с.
3. Теоретические основы радиолокации : учебное пособие для вузов / под ред. Ширмана Я.Д. – М. : Советское радио, 1970. – 560 с.
4. Бакулев П.А. Радиолокационные и радионавигационные системы / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. – М. : Радио и связь, 1994. – 296 с.
5. Астанин Л.Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев. – М. : Радио и связь, 1989. – 192 с.

References

1. Spravochnik po radiolokacii / pod red. M. Skolnika. – M. : Sov. radio, 1976. – 456 s.
2. Spravochnik po osnovam radiolokacionnoj tehniki / pod red. V.V. Druzhinina. – M. : Voenizdat, 1987. – 768 s.
3. Teoreticheskie osnovy radiolokacii : uchebnoe posobie dlya vuzov / pod red. Shirmana Ya.D. – M. : Sovetskoe radio, 1970. – 560 s.
4. Bakulev P.A. Radiolokacionnye i radionavigacionnye sistemy / P.A. Bakulev, A.A. Sosnovskij. – M. : Radio i svyaz, 1994. – 296 s.
5. Astanin L.Yu. Osnovy sverhshirokopolosnyh radiolokacionnyh izmerenij / L.Yu. Astanin, A.A. Kostylev. – M. : Radio i svyaz, 1989. – 192 s.

Надійшла / Paper received : 17.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-28-34
УДК 621.396.96

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ
Національна академія Державної прикордонної служби, м. Хмельницький
А.В. ТКАЧУК
Хмельницький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ КОГЕРЕНТНО-ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ДОППЛЕРІВСЬКИХ ЗМІЩЕНЬ ЧАСТОТИ

В статті досліджуються схеми формування когерентно-імпульсних сигналів, побудованих із застосуванням комплементарних послідовностей. Показано, що додаткова модуляція носійної при формуванні кодованих імпульсів дає змогу отримувати системи сигналів зі специфічними кореляційними властивостями в часовому і частотному розрізі. Розкрито суть основних підходів синтезу даного типу сигналів та їх оптимізації для забезпечення найнижчого рівня бічних сплесків автокореляційної функції та рівномірності поверхні функції невизначеності в якнайширшому діапазоні допплерівських зміщень частоти. В роботі показано та досліджено один із напрямків удосконалення даного типу складних сигналів шляхом застосування внутрішньо-імпульсної частотної модуляції за лінійним і нелінійним законами. На основі проведеного моделювання продемонстровано, яким чином внесення частотної модуляції впливає на вигляд поверхні функції невизначеності. Показано, що одночасне використання деяких комплементарних кодів (наприклад на основі PONS конструкції) і реверсу частоти в сусідніх імпульсах дозволяє отримати послідовність, функція невизначеності якої розподілена майже рівномірно для ненульових допплерівських зміщень. В той же час, побудовані таким чином послідовності зберігають також всі переваги комплементарного кодування. Таким чином можливо подолати основний недолік комплементарно-кодованих послідовностей, а саме їх низьку допплерівську толерантність. Досліджено результати вагової обробки при формуванні когерентно-імпульсних сигналів щодо зниження рівня сплесків функції невизначеності за наявності допплерівських зміщень частоти.

Ключові слова: *комплементарні коди, когерентно-імпульсні сигнали, частотна модуляція, функція невизначеності, кореляційна функція, бічні пелюстки, допплерівське зміщення частоти, радіолокація.*

I.I. CHESANOVSKYI
Academy of State Border Service of Ukraine, Khmelnytskyi
A.V.TKACHUK
Khmelnytskyi National University

INCREASING THE RESOLUTION OF COHERENT-PULSE SIGNALS UNDER THE CONDITIONS OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT

Radar signals, consisting of coherent pulse sequences, provide the system developer with ample opportunities to improve the resolution in both range and speed. One way to improve range resolution is to use complementary codes. Complementary codes give a zone with zero side lobes around the main autocorrelation peak. As the simulation shows, this zero side lobes zone is also preserved in the case of additional frequency modulation of the carrier frequency of the pulses. But this valuable property is quickly lost if the received signal has a Doppler frequency shift. This is the main disadvantage of such signals encoded by complementary codes. The article shows that this problem can be solved by the simultaneous application of a certain complementary code and the corresponding frequency modulation of the carrier in the pulses. The range-Doppler response of pulse trains with different interpulse complementary coding is investigated, including linear, nonlinear, and up-down frequency modulation of the carrier in the pulses. The influence of such types of modulation on the form of the ambiguity function is shown. The use of the code based on PONS construction with up-down nonlinear frequency modulation of the carrier in adjacent pulses resulted in lower ACF side lobes in the rest of the nonzero autocorrelation area near the main lobe peak and lower peaks of ambiguity function for nonzero Doppler. The influence of interpulse weighting on the form of the sequence ambiguity function is also shown. A significant practical advantage of the new complementary phase-coded signal is improved Doppler tolerance, which allows simplifying receiver complexity.

Keywords: *nonlinear frequency modulation, range resolution, Doppler resolution, ambiguity function, complementary code.*

Вступ

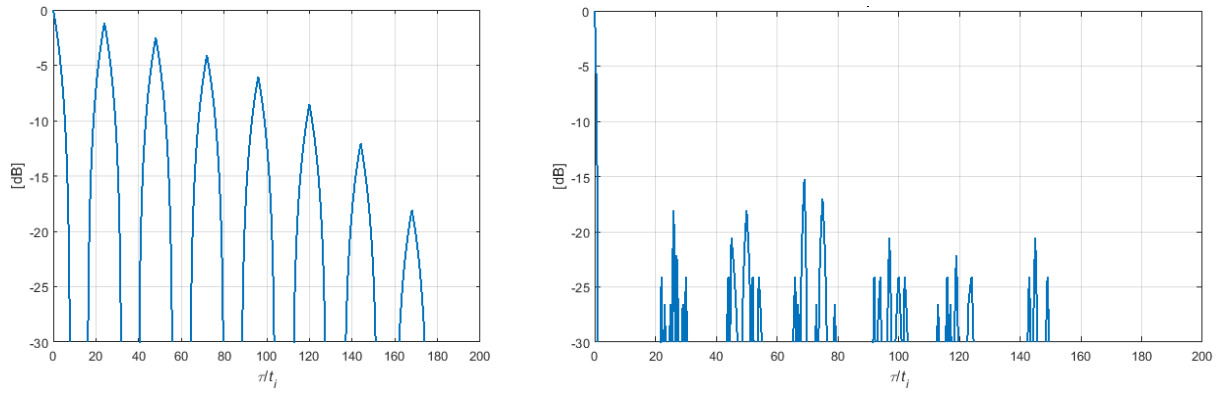
Когерентно-імпульсні сигнали є основою для побудови широкого класу радіотехнічних систем, починаючи з перших поколінь когерентно-імпульсних радіолокаційних систем і закінчуючи сучасними високоточними радіолокаційними системами. Враховуючи стрімкий розвиток елементної бази для формування і обробки сигналів, до сьогоднішнього дня проводиться активний пошук математичних підходів синтезу оптимальних сигналів, функція невизначеності (ФН) яких максимально наближена до ідеальної і забезпечує потенційно можливу роздільну здатність в найширшому діапазоні допплерівських зміщень частоти. У випадку застосування когерентно-імпульсних сигналів існує два аспекти збільшення роздільної здатності:

По-перше, підвищення роздільної здатності когерентної послідовності імпульсів відносно часової затримки, що досягається за рахунок штучного розширення спектру. Наслідком цього розширення є зменшення ширини центрального сплеску автокореляційної функції (АКФ), що часто супроводжується підвищенням неоднорідності розподілу функції невизначеності для ненульових допплерівських зміщень частоти і як наслідок – втрати показників роздільної здатності за часом затримки при наявності допплерівських зміщень, що для більшої частини радіолокаційних систем є небажаним.

По-друге, покращення характеристик сигналу для ненульових допплерівських зміщень частоти, що

є тотожним зниженню рівня сплесків на поверхні функції невизначеності, досягається шляхом штучного формування спектру сигналу, що досягається додатковою модуляцією і узгодженням низки параметрів сигналу.

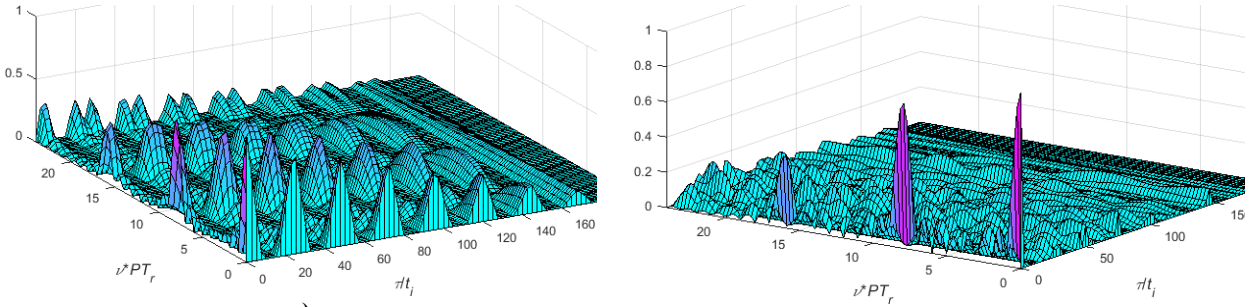
Для реалізації першого аспекту розглянемо когерентно-імпульсні сигнали побудовані з використанням комплементарних послідовностей, які володіють оптимальними кореляційними властивостями за нульового допплерівського зміщення частоти. На рис. 1 наведено АКФ двох сигналів, що складаються з послідовності восьми пакетів з восьми прямокутних імпульсів у кожному без застосування модуляції комплементарним кодом (рис. 1, а) і з застосуванням коду на основі послідовності Адамара (рис. 1, б).



а) **б)**

Рис. 1. АКФ послідовності імпульсів без модуляції комплементарним кодом (а) і з модуляцією (б)

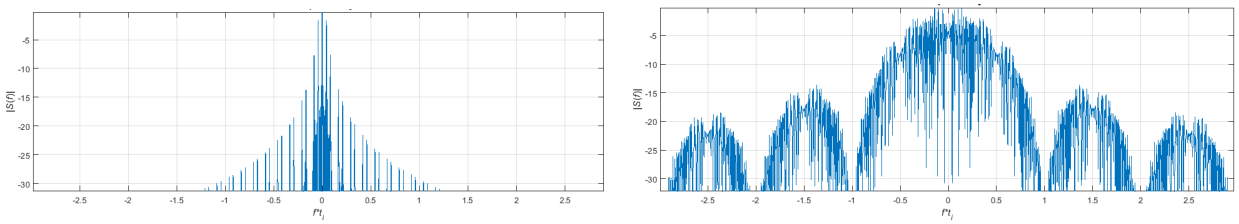
Звичайно, настільки масштабне стискання головної і зниження рекурентних пелюсток АКФ супроводжується значним (пропорційним) розширенням спектру, проте, визначним в застосуванні даних кодів, є наявність «нульової» зони біля головної пелюстки АКФ. На жаль, за наявності незначного допплерівського зміщення частоти, сигнал модульований комплементарним кодом втрачає свої властивості, внаслідок чого відбувається різке збільшення бокових пелюсток, що продемонстровано на рис. 2.



а) **б)**

Рис. 2. Зріз поверхні функції невизначеності без модуляції комплементарним кодом (а) і з модуляцією (б)

З наведених поверхонь ФН (рис. 2) видно, що за наявності незначних допплерівських зміщень частоти виграш від додаткової модуляції стає несуттєвим, що з урахуванням розширення спектру сигналу (рис. 3) робить таку схему побудови сигналів недоцільною в цьому випадку.



а) **б)**

Рис. 3. Частотний спектр сигналу без додаткової модуляції (а) і з модуляцією комплементарним кодом (б)

Проте, аналіз рис. 2, б і рис. 3, б наводить на припущення, що проблема не в схемі формування сигналу, а в некоректному виборі форм і параметрів модуляцій. Про це свідчить нерівномірність спектру сигналу, що обумовлює чутливість до допплерівських зміщень в сигналі.

На сьогодні існують рішення для даного класу сигналів, що дають змогу частково усунути даний недолік і запобігти значному погіршенню роздільної здатності сигналів з допплерівським зміщенням частоти. В ряді робіт пропонується застосовувати низку додаткових частотних фільтрів узгоджених з

сигналами, що містять допплерівські зміщення в певному діапазоні. В даній роботі показано, що за допомогою одночасного застосування певних комплементарних кодів і відповідної частотної модуляції в кодованих імпульсах можливо добитись майже рівномірного розподілу тіла функції невизначеності в широкому діапазоні допплерівських зміщень. Також розглядається застосування вагових вікон в часовій області, що дає змогу значно знизити рівень пульсацій на поверхні ФН, що значно полегшує визначення частотних зміщень сигналу, проте обумовлює деяку енергетичну неефективність в роботі силових каскадів передавача через обмеження амплітуди вихідних імпульсів.

Результати дослідження. Розглянемо окремо засоби поліпшення роздільної здатності в часовій і частотній області.

В роботах [2, 3] запропоновано метод, що ґрунтується на використанні комплементарних кодів для фазової модуляції імпульсів в когерентно-імпульсних сигналах, що дає змогу значно покращити роздільну здатність сигналів за нульових допплерівських зміщень частоти. За визначенням, комплементарна послідовність (код) володіє нульовим рівнем АКФ при всіх значеннях зміщення окрім нульового. Одним із різновидів комплементарних кодів є ортогональні коди. Кодовані послідовності імпульсів на основі ортогональних кодів отримують шляхом накладання рядків ортогональної матриці на пакети імпульсів послідовності. При цьому фаза кожного імпульсу змінюється на відповідну величину, яка знаходиться на такій самій позиції в рядку матриці, як і імпульс в пакеті [2, 3]. Для дослідження властивостей когерентно-імпульсних послідовностей модульованих комплементарними кодами, було обрано дві матриці розміром 8x8 – матрицю Адамара і PONS матрицю [3].

При формуванні когерентно-імпульсних послідовностей, що складаються з набору імпульсів, комплексна обвідна послідовності P пакетів, кожен з яких має тривалість T і розбитий на M імпульсів тривалості t_i, може бути представлена

$$\dot{g}(t) = \sum_{p=1}^{P}\sum_{m=1}^{M} \dot{a}_{p,m}\dot{s}_m[t-(p-1)T_r] \tag{1}$$

де $\dot{s}_m(t)$ – комплексна обвідна m-го імпульсу, $\dot{a}_{p,m} = \exp(j\varphi_{p,m})$ – елемент матриці $\boldsymbol{A}$, який використовується для кодування m-го імпульсу пакету p.

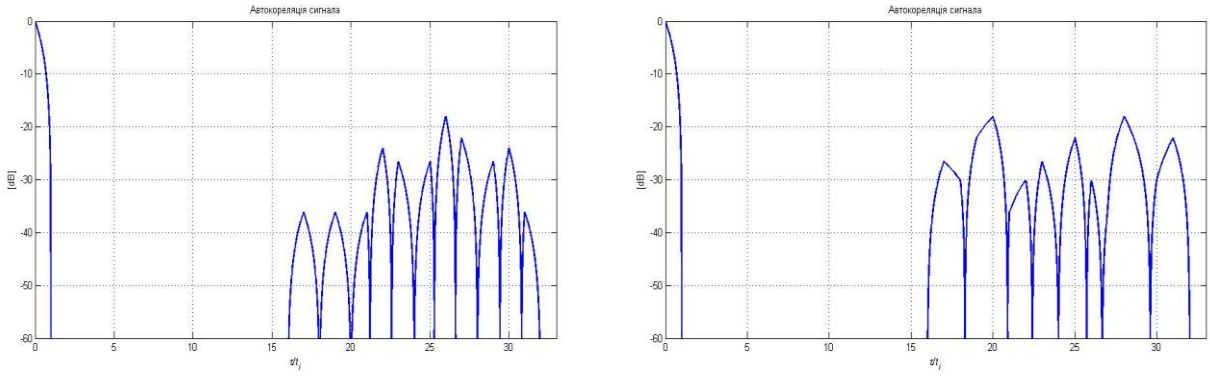
Матриця $\boldsymbol{A(P,M)}$ містить комплементарну послідовність, яка подана у вигляді P рядків з M елементами кожен. Елементи кожного з рядків матриці використовуються для формування P-го пакету імпульсів когерентної послідовності.

Розглянемо два варіанти комплементарних послідовностей, отриманих на основі матриці Адамара і PONS матриці [3, 5]. Фазова складова цих матриць має вигляд

$$\{\varphi_{p,m}\}_{HAD} = \pi\begin{bmatrix} 0&0&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&1&1&1&1&0&0\\ 0&1&1&0&0&1&1&0\\ 0&0&0&0&1&1&1&1\\ 0&1&0&1&0&1&0&1\\ 0&0&1&1&0&0&1&1\\ 0&1&0&1&1&0&1&0\\ 0&1&1&0&1&0&0&1 \end{bmatrix}; \quad \{\varphi_{p,m}\}_{PONS} = \pi\begin{bmatrix} 0&0&0&1&0&0&1&0\\ 0&0&0&1&1&1&0&1\\ 0&0&1&0&0&0&0&1\\ 1&1&0&1&0&0&0&1\\ 0&1&0&0&1&0&0&0\\ 0&1&0&0&0&1&1&1\\ 1&0&0&0&0&1&0&0\\ 0&1&1&1&0&1&0&0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Матриці приведені до бінарного вигляду, тому при застосуванні BPSK, $a_{p,m} = 1$ відповідатиме $\varphi_{p,m} = 0$, а $a_{p,m} = 0$, відповідно $\varphi_{p,m} = \pi$.

Автокореляційні функції (АКФ) даних комплементарних послідовностей представлені на рис. 4.



а) **б)**

Рис. 4. АКФ комплементарних послідовностей на основі матриці Адамара (а) і матриці PONS (б)

Як видно з АКФ (рис. 4), при застосуванні комплементарного коду, основна пелюстка АКФ звужується до меж $-t_i \le \tau \le t_i$, в інтервалі тривалості пакету імпульсів $t_i \le \tau \le T$ бічні пелюстки взагалі

відсутні.

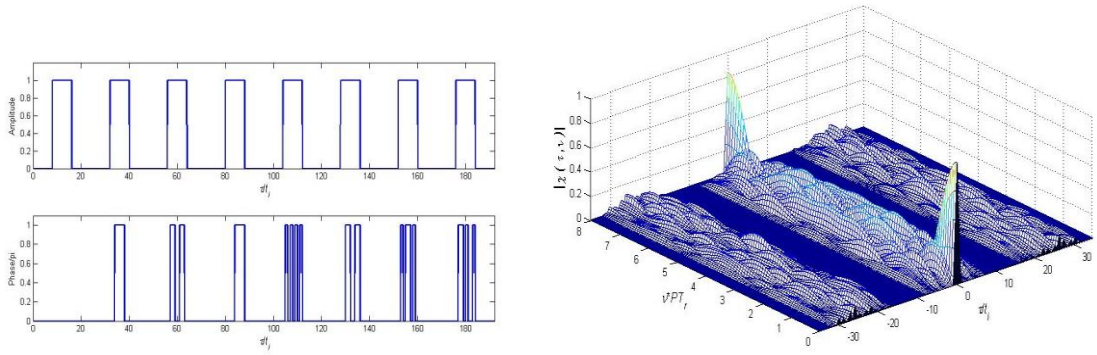
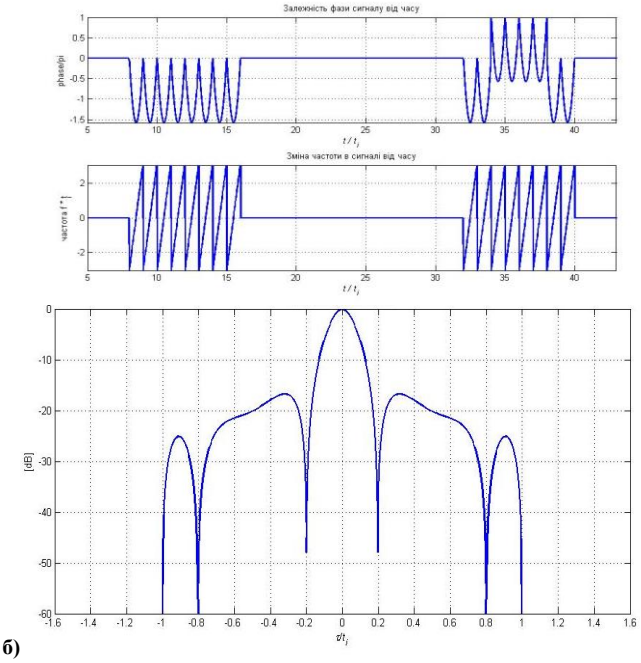


Рис. 5. Послідовність імпульсів модульованих по фазі кодом Адамара і її функція невизначеності

На рис. 5 показано приклад формування когерентно-імпульсної послідовності із застосуванням додаткової фазової модуляції комплементарним кодом Адамара і її функцію невизначеності. Додаткова частотна модуляція в імпульсах відсутня. Навколо центрального сплеску, який знаходиться в межах $-t_i \le \tau \le t_i$, для нульового допплерівського зміщення відсутні бічні пелюстки. Рекурентні сплески від пакетів імпульсів значно послаблені до рівня -18 Дб, рис. 4. Проте, як видно з вигляду функції невизначеності послідовності, за наявності частотного зміщення відбитого сигналу, зона ненульової кореляції збільшується до розміру $-8t_i \le \tau \le 8t_i$, при цьому через значні сплески ФН рівень бічних пелюсток також буде значним.

а)



б)

Рис. 6. Зміна фази і частоти (перші два пакета імпульсів)(а) і АКФ когерентної послідовності імпульсів при модуляції комплементарною послідовністю та ЛЧМ (б)

Для подальшого вдосконалення сигналу застосуємо всередині кожного імпульсу частотну модуляцію. Найпростішим прикладом є лінійна частотна модуляція (ЛЧМ). На рис. 6а наведено зміну фази в імпульсах перших двох пакетів для коду Адамара і залежність частоти від часу. На рис 6б наведена АКФ послідовності. Ширина центрального сплеску зменшилась, база модуляції визначалась так, щоб центральний сплеск знаходився в межах $-0.2t_i \le \tau \le 0.2t_i$ (рис. 6, б). Інтервал ненульової зони автокореляції, як і в попередньому випадку, займає інтервал часових зміщень $-t_i \le \tau \le t_i$, поблизу центрального сплеску спостерігаються бічні пелюстки, які досягають рівня -17 Дб.

На рис. 7 наведено ФН когерентної послідовності імпульсів кодованої комплементарним кодом Адамара і з ЛЧМ носійної в імпульсах. На рис. 8 наведена функція невизначеності такого сигналу при застосуванні коду PONS. Вигляд функції автокореляції для різних кодів в межах довжини кодованого імпульсу біля центрального сплеску $-t_i \le \tau \le t_i$ однаковий і не залежить від типу коду рис. 6, б.

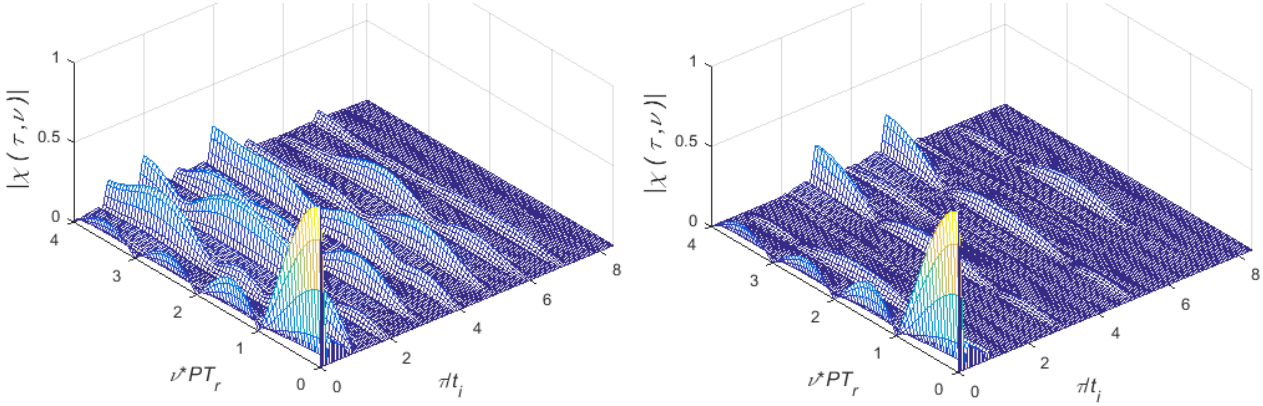


Рис. 7. Функція невизначеності для коду Адамара

Рис. 8. Функція невизначеності для коду PONS

Справедливо припустити, що згладжування функції частотної модуляції позитивно вплине на вигляд ФН для ненульових значень допплерівських зміщень.

На рис. 9 наведено залежність фази та частоти носійної в межах імпульсу когерентної послідовності при нелінійній частотній модуляції (НЛЧМ) (використовувалась частотна залежність Прайса [2, 5]) . Глибина НЛЧМ, як і в попередньому випадку, підібрана таким чином, щоб ширина центрального сплеску знаходилась а межах $-0.2t_i \le \tau \le 0.2t_i$. Аналітично такий сигнал можна виразити, доповнивши (1) функцією НЛЧМ:

$$\dot{g}(t) = \sum_{p=1}^{P}\sum_{m=1}^{M} \dot{a}_{p,m}\dot{s}_m[t-(p-1)T_r]e^{j\varphi(t-(p-1)T_r-(m-1)t_i)} \qquad (2)$$

де $\varphi(t)$ – фазова функція носійної m-го кодового імпульсу.

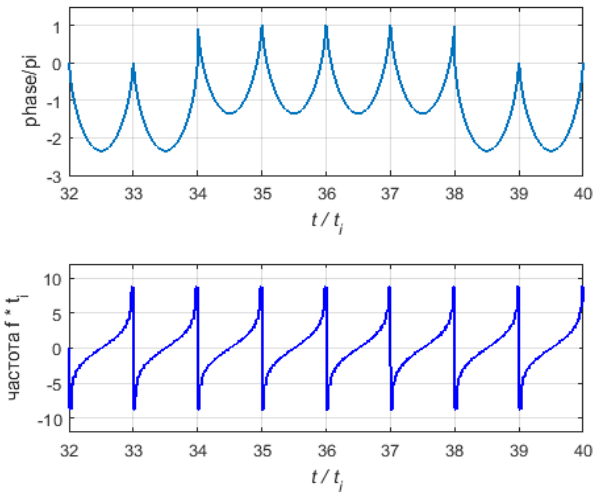


Рис. 9. Фаза і частота НЛЧМ кодованого імпульсу

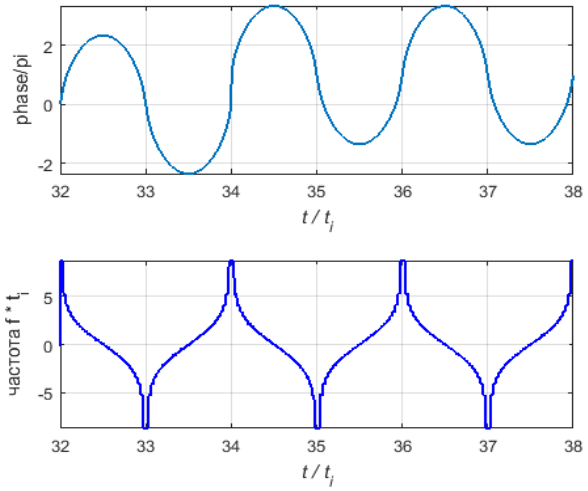


Рис. 10. Фаза і частота НЛЧМ кодованого імпульсу з реверсом модулюючої частоти

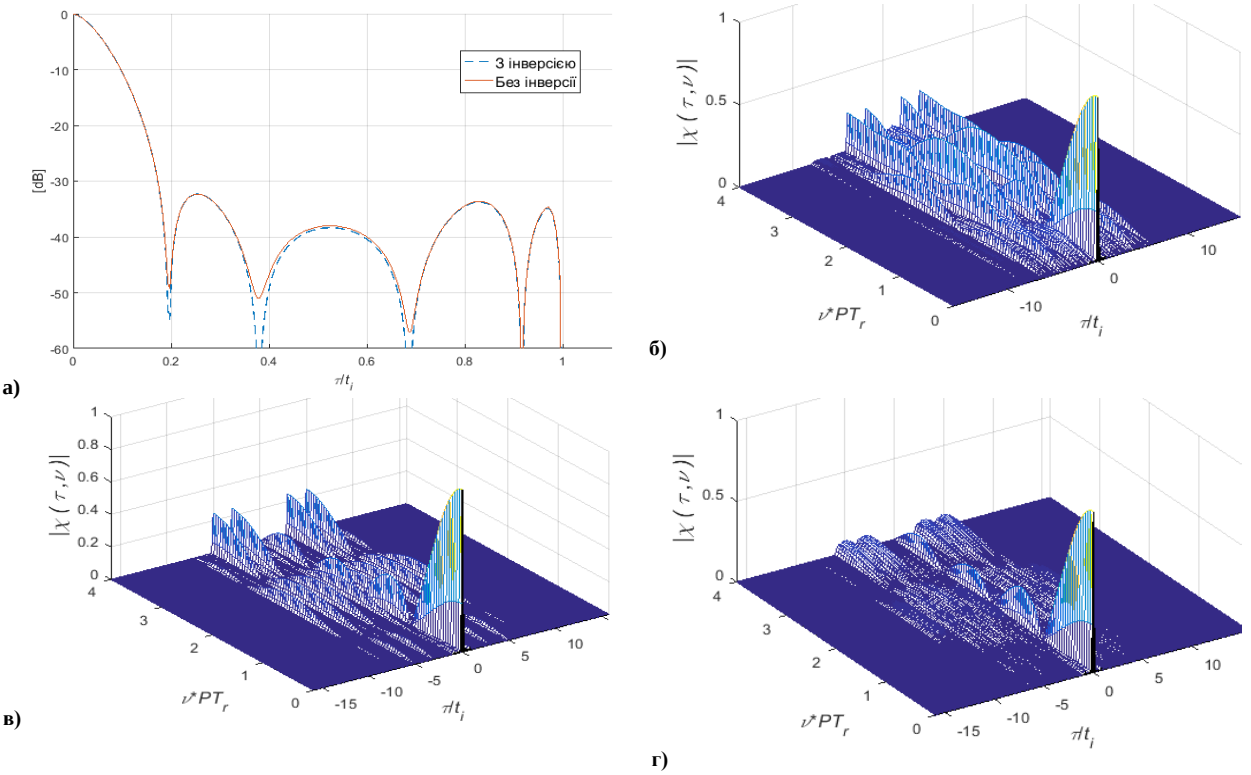


Рис. 11. АКФ когерентно-імпульсного сигналу в межах одного кодуючого імпульсу (а); ФН сигналу з НЛЧМ, кодом Адамара, без реверсу частоти (б); ФН сигналу з НЛЧМ, кодом PONS, без реверсу частоти (в); ФН сигналу з НЛЧМ, кодом PONS, з реверсом частоти (г)

Як видно з рис. 9, функція частотної модуляції може бути ідентичною в кожному імпульсі, проте за такої схеми, особливо з огляду на нелінійність $\varphi(t)$, практично неможливо усунути розриви фазової функції між імпульсами, що призводить до погіршення ФН в зоні ненульових допплерівських зсувів. Значно спростити процедуру синтезу сигналу з неперервною фазою можна за допомогою реверсу модулюючої частотної функції між імпульсами. На рис. 10 показано залежність фази і частоти імпульсу при застосуванні реверсу модулюючої функції між імпульсами.

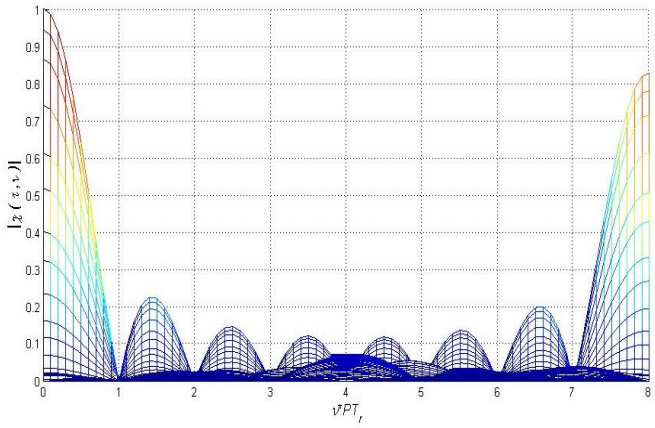


Рис. 12. Частотний перетин ФН сигналу НЛЧМ з реверсом і PONS

На рис. 11 показано результат застосування НЛЧМ при формуванні когерентно-імпульсних послідовностей у вигляді АКФ (рис. 11, а), з якого видно, що застосування НЛЧМ, як і при ЛЧМ, призводить до появи бічних пелюсток, проте їх рівень складає близько -32 дБ (за ЛЧМ було -17 дБ). Також видно, що реверс частоти не міняє вигляд центрального сплеску автокореляції, чого не можна сказати про рівномірність розподілу ФН для ненульових допплерівських зміщень. З вигляду поверхонь ФН (рис. 11, б, в, г) можна зробити висновок, що застосування таких конструкцій сигналів дає змогу значно послабити бічні пелюстки, особливо в області сильної кореляції (біля основного сплеску). Комбінація коду PONS і реверсу частоти сусідніх імпульсів, призвела до майже рівномірного розподілу тіла функції невизначеності для ненульових допплерівських зміщень. На рис. 12 наведено вигляд ФН з боку частотної осі в межах першого рекурентного сплеску. На рис. 12 залишились ще ряд сплесків, які розташовані паралельно осі частот для часового зміщення $\tau = 0$. Як показано в [2], ці сплески є наслідком прямокутної форми амплітудної залежності кодованих імпульсів.

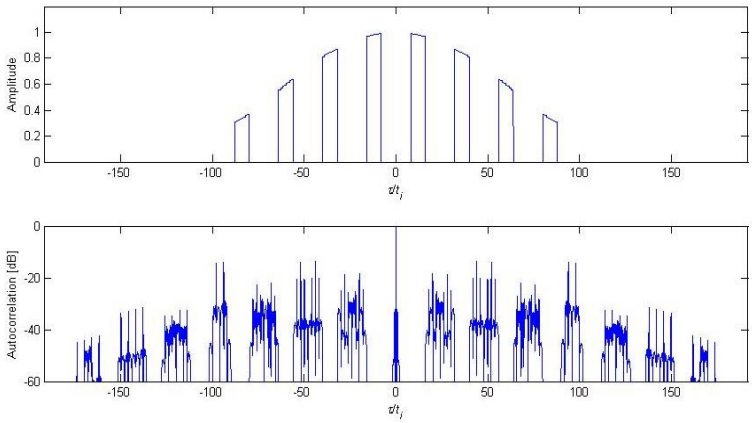


Рис. 13. Амплітуда послідовності зваженої вікном Хаммінга і її АКФ

Для усунення цих сплесків можна застосувати вагову обробку когерентної послідовності імпульсів вздовж осі часу. На рис. 13 наведено залежність амплітуди імпульсів в послідовності і її АКФ в ході застосування комплементарного коду.

На рис. 14 приведено ФН і її частотний зріз в межах першого кореляційного сплеску. Як видно з рисунків, вагова обробка послідовності імпульсів дала змогу практично усунути значні неоднорідності розподілу тіла ФН і досягти високого значення роздільної здатності в широкому діапазоні допплерівських зміщень, що робить даний тип сигналів практично придатним.

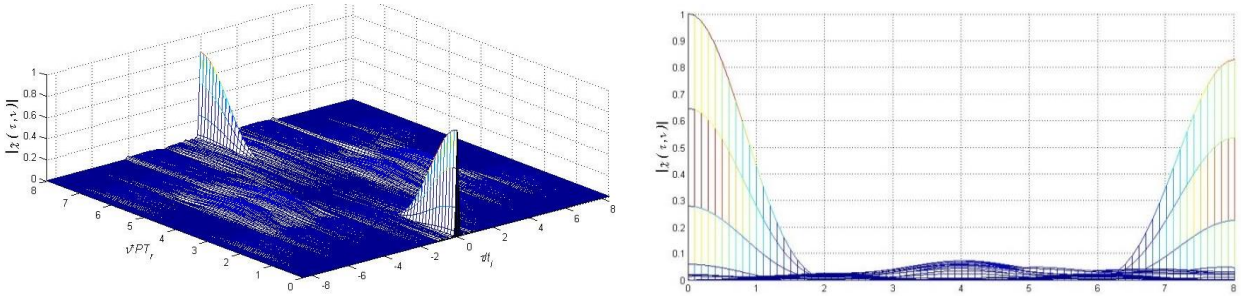


Рис. 14. ФН імпульсної послідовності з НЛЧМ, комплементарним кодом і ваговою обробкою

Слід зазначити, що ціною вагової обробки сигналу в часовій області стало погіршення роздільної здатності по частоті. Якщо порівняти рис. 14 із рис. 12 можна помітити, що внаслідок застосування вагової обробки ширина центрального сплеску зросла майже в 1,8 разів.

Висновки

Як видно із наведених результатів дослідження, когерентні послідовності імпульсів з частотною модуляцією носійної і модульованих по фазі комплементарними кодами, дають змогу досягти неймовірних показників роздільної здатності, в тому числі за наявності допплерівських зміщень частоти. Звичайно, схема формування даних послідовностей є доволі складною і вимагає застосування одночасно декількох методів модуляції і штучного розширення спектру, проте виграш в роздільній здатності і завадостійкості (за рівнем бічних пелюсток до -35 дБ) повністю себе виправдовує.

В даній роботі показано ефект від застосування лише найпростіших комплементарних кодів, тому очевидно, що для конкретних задач при спеціальному виборі кодів можна досягти значно вищих показників як в частотному, так і в часовому розрізі.

Література

1. Кук Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд. – Москва : Советское радио, 1971. – 568 с.

2. Levanon N., Eli Mozeson Radar Signals. New Jersey:John Wiley & Sons,2004. 411 p.

3. Levanon N., Mozeson E. Removing autocorrelation sidelobes by overlaying orthogonal coding on any train of identical pulses. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39. № 2. P. 583–603.

4. Чесановський І.І. Синтез когерентних послідовностей імпульсів з лінійно-частотною модуляцією і нелінійними кроками носійної / І.І. Чесановський, А.В. Ткачук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 6(267). – С. 134–142.

5. Чесановський І.І. Підвищення ефективності когерентно-імпульсних сигналів на основі застосування комплементарних кодів / І.І. Чесановський, А.В. Ткачук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 5(277). – С. 152–158.

References

1. Kuk Ch. Radiolokacionnye signaly / Ch. Kuk, M. Bernfeld. – Moskva : Sovetskoe radio, 1971. – 568 s.

2. Levanon N., Eli Mozeson Radar Signals. New Jersey:John Wiley & Sons,2004. 411 p.

3. Levanon N., Mozeson E. Removing autocorrelation sidelobes by overlaying orthogonal coding on any train of identical pulses. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39. № 2. P. 583–603.

4. Chesanovskyi I.I. Syntez koherentnykh poslidovnostei impulsiv z liniino-chastotnoiu moduliatsiieiu i neliniinymy krokamy nosiinoi / I.I. Chesanovskyi, A.V. Tkachuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2018. – № 6(267). – S. 134–142.

5. Chesanovskyi I.I. Pidvyshchennia efektyvnosti koherentno-impulsnykh syhnaliv na osnovi zastosuvannia komplementarnykh kodiv / I.I. Chesanovskyi, A.V. Tkachuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2019. – № 5(277). – S. 152–158.

Надійшла / Paper received : 25.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-35-38
УДК 621

О.О. ПОЛЬНОВ, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, В.В. МІШАН
Хмельницький національний університет

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖ

Сучасна телекомунікаційна мережа складається з великої сукупності елементів. В мережу можуть входити як вузли, що стаціонарні, так і мобільні засоби. Розробка топології такої мережі вимагає критичного аналізу роботи за умов можливої динамічної зміни навантаження. В роботі показано аналіз сучасних програмних засобів моделювання роботи мережі. Емулятори NS-2, Riverbed OPNET Modeler, Cisco Packet Tracer є представниками великої сукупності таких технічних засобів. В пакетах моделювання мережі доступно використання різноманітного обладнання. Cisco Packet Tracer орієнтовано на моделювання із застосуванням обладнання фірми Cisco. OPNET Modeler навпаки – орієнтований на створення моделі із застосуванням як існуючого обладнання різних виробників, так і моделей обладнання без прив'язки до виробника.

Ключові слова: силова лінія, передача даних, перетворення Фур'є.

O.O. POLNOV, K.L. HORIASHCHENKO, V.V. MISHAN
Khmelnitsky national university, Ukraine

MODERN NETWORK MODELLING SOFTWARE

Modern telecommunication network consist of large amount of components like servers, routers, switches, end-point computers. Fibre channels and usual gigabit lines used as a medium. Modern network can combine not only static elements but mobile components like mobile phones, ZigBee modules, Wi-Fi access points, Bluetooth. High speed equipment like satellites can be added to network structure too.

So, selecting of correct equipment for network, estimating characteristics of such network can be hard task to be done in most cases. The analysis of modern programmatic facilities of design of work of network is in-process shown. Emulators of NS - 2, Riverbed OPNET Modeler, Cisco Packet Tracer are the representatives of large aggregate of such technical equipments. In the packages of design of network accessible the use of various equipment. It is oriented Cisco Packet Tracer to the design with application of equipment of firm Cisco. OPNET Modeler vice versa - oriented to creation of model with application of both existent equipment of different producers and models of equipment without attachment to the producer.

Keywords: power line, data transmission, Fourier transform.

Вступ

Сучасні технології дозволяють використовувати мережі зв'язку не тільки для звичайного перегляду web - сторінок і відправки електронних листів, але і для передачі голосу і відео. Трафік пакетних даних досяг таких обсягів, що для телекомунікаційних компаній будь-якого типу він став помітним джерелом доходів, тому мережі IP експлуатуються все активніше [1, 2]. З метою збільшення прибутку оператори намагаються підвищити ефективність використання мережі, а значить, методи оптимізації мереж IP набувають все більшої значущості. Максимальний комерційний ефект від мережі IP не може бути отриманий без раціонального використання всіх мережевих ресурсів - в першу чергу маршрутизаторів і каналів зв'язку. Функціонування пакетної мережі можна вважати ефективним тільки тоді, коли кожен ресурс завантажений, але водночас не перевантажений.

Кілька років тому послуги телебачення і телефону надавалися користувачам по різних мережах доступу. В кінці 90-х - початку 2000 року в телекомунікації почався новий етап розвитку індустрії, а саме конвергенція трафіку. Тепер по одним і тим же мереж доступу користувачі можуть отримувати послуги і телебачення, телефонії, доступу в Internet та ін. [3] Види сервісів. Однак методи маршрутизації, які застосовувалися для трафіку єдиного типу сервісу, стали неефективними для трафіку пакетів різних сервісів.

У зв'язку з цим виникла потреба створення систем маршрутизації, які при побудові шляху враховували б не тільки

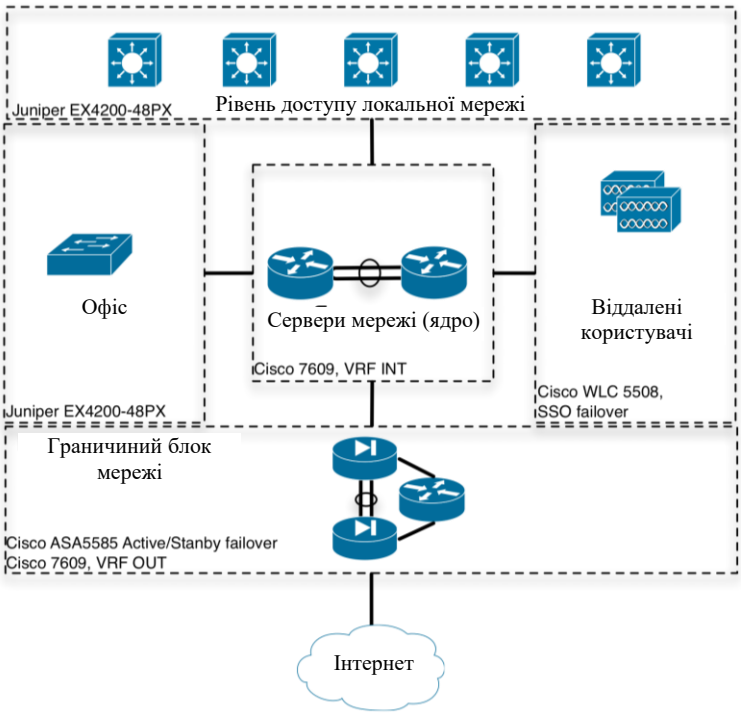


Рис. 1. Мережеве устаткування різного призначення

технічні характеристики обладнання і каналів, а й його вартість.

Проблеми надання послуг необхідної якості

Для якісного надання будь-якої послуги оператори зв'язку повинні мати ресурсну базу (маршрутизатори, канали зв'язку та інше обладнання), технічні характеристики якої задовольняють всім вимогам цієї послуги. При цьому різні типи сервісів мають різні вимоги до технічних характеристик мережі зв'язку. Так, для простої передачі даних (пересилання електронної пошти або файлів) критична тільки ширина пропускання каналів зв'язку, тоді як для IP-телефонії найбільшим пріоритетом є мінімальний час затримки обробки IP пакетів на шляху проходження до адресата.

На різних ділянках мережі може перебувати різне обладнання зі своїм набором характеристик [4]. Для деякого сервісу не всі пристрої мережі можуть задовольняти вимогам до ресурсів. Тому такі пристрої не повинні входити в маршрут прямування IP пакетів цього сервісу. Таким чином, не всі послуги можуть надаватися по деяких дільницях мережі.

Для вирішення завдань створення мереж розробляється мережеве устаткування різного призначення (рис. 1): комутатор - мережеве устаткування для об'єднання комп'ютерів в одну або декілька локальних мереж; маршрутизатор - пристрій, призначений для взаємодії комп'ютерів, що знаходяться в різних локальних мережах і надання доступу в мережу Інтернет; міжмережевий екран - пристрій, що забезпечує безпеку в мережі і так далі.

Технології, що використовувані при побудові захищених корпоративних мереж

Вибираючи технологію, яка використовуватиметься при реалізації проекту, необхідно відразу обертати уваги на декілька моментів. По-перше – технологія повинна задовольняти вимогам проекту – забезпечувати необхідну пропускну спроможність, масштабованість, захищеність передаваної інформації і так далі. По-друге, технологія має бути стандартизована, і широко поширена – це дозволить уникнути проблем в ході впровадження і експлуатації (наприклад, припинення підтримки вибраної технології виробниками устаткування) [5]. Ще один аргумент на користь рішень на основі стандартних протоколів – незалежність від виробника устаткування, і гарантія можливості подальшої модернізації мережі з використанням актуальних рішень.

Фізичний рівень визначає середовище передачі даних і протокол. Для ЛВС під вимоги актуальності для завдання проекту і поширеності підходить оптичне середовище передачі даних і вита пара [6, 7]. Для безпровідної – тільки радіоканал, причому в частотних діапазонах не вимагаючих додаткових дозволів на використання.

У виборі протоколів канального рівня для дротяної мережі – з поширених під вимогу поширеності, доступності і забезпечення пропускної спроможності підходить тільки сімейство IEEE 802.3, Ethernet. У другу чергу:

- 802.3ae, 10 Гбіт/з по оптичному волокну;
- 802.3ab, GigabitEthernet по витій парі;
- 802.3af, Power over ethernet;
- 802.3ad, агрегація каналів.

Емулятори мережевого обладнання

Усі емулятори мережевого устаткування можна розділити на дві основні групи:

1. Апаратно-реалізовані емулятори.
2. Програмно-реалізовані емулятори.

До першої групи відносять, як правило, вузько спеціалізоване устаткування, що дозволяє при підключенні до нього реального телекомунікаційного устаткування імітувати роботу реальної телекомунікаційної мережі, або якійсь її частині (як правило - каналів зв'язку). У апаратних емуляторах на апаратному рівні реалізовані процеси, що протікають в реальних мережах, - виникнення затримок, втрат пакетів, спотворення передаваних даних і тому подібне подій. Основна мета розробки і застосування апаратних емуляторів - дослідження роботи реального телекомунікаційного устаткування в різних умовах і при різних характеристиках каналів [8].

До другої групи емуляторів відносять спеціально розроблені програми, що дозволяють імітувати роботу устаткування і каналів зв'язку, а також роботу командних інтерфейсів активного мережевого устаткування [8]. Основна мета використання програмних емуляторів - застосування в якості науково-дослідної діяльності, для постановки наукових експериментів. Також, ці програми часто використовуються як повчальні системи для підготовки персоналу в роботі з мережевим устаткуванням [9].

Більшість емуляторів досить зручна у використанні, оскільки надають графічний інтерфейс для управління мережевою інфраструктурою, що буває набагато зручніший чим управління підключеннями реальних пристроїв [10].

Серед засобів імітаційного моделювання окремих подій і станів безпровідних сенсорних мереж на базі стандарту IEEE 802.15.4-2006 найбільше поширення отримала наступні середовища:

1. OPNET Modeler (поточна версія 16.0);
2. OMNET++ (поточна версія 4.1);
3. NS-2 (поточна версія 2.34).

NS-2 - об'єктно-орієнтоване середовище імітаційного моделювання дискретних подій і станів з відкритим початковим кодом, яка розроблена у рамках проекту VINT. Середовище моделювання написане

на C++ і TCL. NS-2 використовує TCL для генерації сценаріїв - це дозволяє генерувати комплексні сценарії за допомогою скриптів.

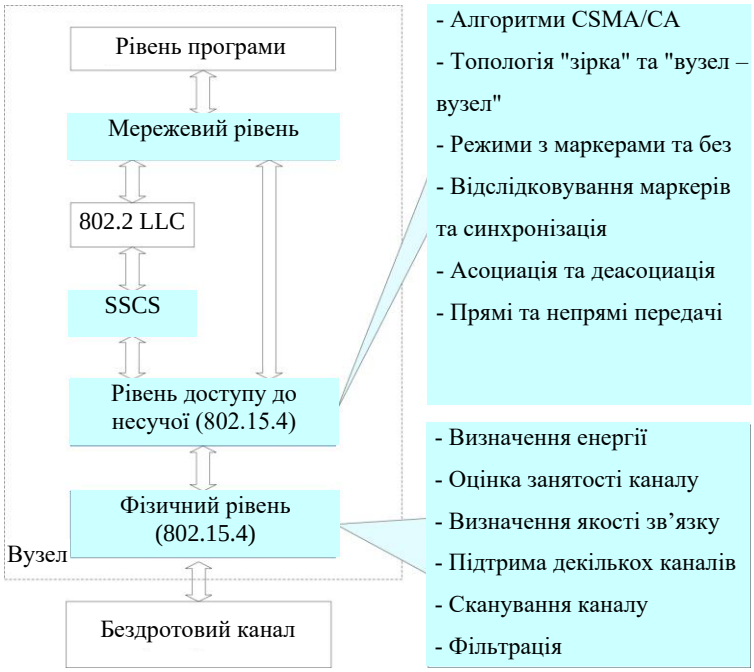


Рис. 2.Структура компонентів моделі LR-WPAN NS-2

Спочатку NS-2 підтримував моделювання тільки статичних комп'ютерних мереж TCP/IP. Проте зараз мобільні вузли підтримуються, що дозволяє моделювати мобільні мережі ad-hoc. Підтримуються протоколи маршрутизації ad-hoc AODV, DSDV, DSR і TORA, але вони вимагають доопрацювання для коректної роботи з мобільними вузлами.

Для NS-2 існує модель, що реалізовує стандарт IEEE 802.15.4, розроблена Джинлиан Женгом та ін. Структура компонентів моделі LR - WPAN і основні її функції представлені на рис. 2.

OPNET Modeler - потужне середовище імітаційного моделювання дискретних подій і станів. Вона включає безліч бібліотек мережевих технологій і протоколів зв'язку, таких як TCP/IP, протокол передачі гіпертексту (HTTP), технологія асинхронного режиму передачі (ATM) і FrameRelay, IP - QoS, 802.11 (Wi - Fi), ZigBee та ін. (рис 3). Ці бібліотеки поставляють блоки для побудови моделей мереж. Одним з безлічі модулів, доступних в OPNET Modeler, є безпровідним модуль. Він розширює функціональність середовища для імітаційного моделювання і аналізу безпровідних мереж.

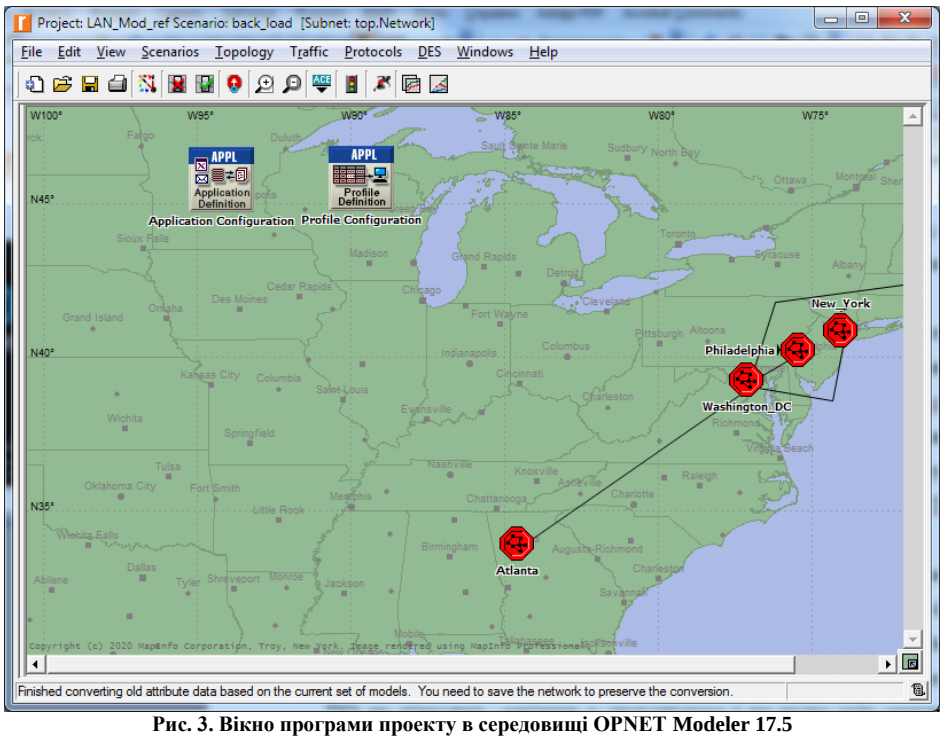


Рис. 3. Вікно програми проекту в середовищі OPNET Modeler 17.5

У версії OPNET Modeler 14.0 доступні моделі вузлів ZigBee, розроблені самою компанією OPNET. При цьому початковий код моделі мережевого рівня і рівня додатків прихований від користувачів. Доступний тільки код моделі нижнього рівня 802.15.4.

Найпопулярнішим емулятором мережевого устаткування є Cisco Packet Tracer, це емулятор, розроблений самою компанією Cisco Systems для навчання починаючих фахівців. Cisco Packet Tracer отримав велике поширення за рахунок необхідності його застосування для проходження навчання у рамках програм Cisco Network Academy, мережевої академії, в якій щорічно проходять навчання десятки тисяч початкуючих фахівців [5].

Створення мережевої інфраструктури і подальша модифікація відбуваються через графічний

інтерфейс, який є інтуїтивно зрозумілим і найбільш зручних з графічних інтерфейсів управління, що надаються даними програмними засобами емуляції мережевого устаткування. Інтерфейс добре адаптований для початкуючих фахівців і дуже сильно спрощує процес створення нових мережевих інфраструктур або запуск і налаштування необхідних для проведення практичних занять сервісів.

Висновки

6. Присутні на ринку програмних засобів технічні реалізації середовищ з моделювання параметрів телекомунікаційних мереж мають широкий спектр властивостей.

7. Для сучасного ПО властиво забезпечення моделювання мережевого устаткування відомих виробників. Так OPNET Academic Modeler містить моделі як відомих виробників так і моделі для маніпуляцій з налаштуваннями. UNetLab, навпаки моделює роботу обладнання Cisco, проте надає можливість емуляції роботи середовища операційної системи Cisco IOS.

8. Засоби емуляції також підтримують створення моделей мереж із застосуванням мобільних вузлів – ZigBee, LTE, Wi-Fi.

9. В пакетах моделювання мережі доступно використання різноманітного обладнання. Cisco Packet Tracer орієнтовано на моделювання із застосуванням обладнання фірми Cisco. OPNET Modeler навпаки – орієнтований на створення моделі із застосуванням як існуючого обладнання різних виробників, так і моделей обладнання без прив'язки до виробника.

Література

1. Локальные сети: архитектура, алгоритмы, проектирование. / Ю.В. Новиков, С.В. Кондратенко – М.: ЭКОМ, 2001. – 312 с.

2. Горященко К.Л. Огляд систем імітаційного моделювання телекомунікаційних мереж / К.Л. Горященко, М.Д. Доротюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – №5. – С. 115-118

3. Компьютерные сети. Книга 2: Networking Essentials. Энциклопедия пользователя: пер. с англ. / А. Марк, Д. Спортак и др. – К.: Изд-во «ДиаСофт», 1999. – 468 с.

4. UNetLab: List of supported images [Электронный ресурс] / A. Dainese. URL: http://www.unetlab.com/documentation/supported-images/index.html – свободный. – Загл. с экрана. – Яз. Англ. Дата обращения: 16.03.2017 г.

5. Корпоративные сети связи / Т.И. Иванова. Пособие. – Москва 2001, – 297 с.

6. Горященко К.Л. Впровадження технологій PLC / К.Л. Горященко, О.П. Войтюк, С.Л. Кушнірук, О.В. Шевчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – №2. – С. 250-253.

7. Збаравський В.В. Реалізація концепції Triple play в мережі ADSL / В.В. Збаравський, К.Л. Горященко, Л.О. Ковтун // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – №2. – С. 266-270.

8. Использование программных средств эмуляции оборудования при модификации сетевой инфраструктуры / Е.Ф. Попов// Сборник научных трудов по материалам всероссийскую научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону». Тюмень, 2012.

9. Introduction to Cisco IOS Netflow:A Technical Overview / URL: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/ios-nx-os-software/ios-netflow/prod_white_paper0900aecd80406232.html – свободный. – Загл. с экрана. – Яз. Англ. Дата обращения: 16.03.2017 г.

10. Вычислительные сети и сетевые протоколы / Д. Девис, Д. Барбер, У. Прайс – М.: Мир, 1982. – 562с.

References

1. Lokal'nye seti: arhitektura, algoritmy, proektirovanie. / Ju.V. Novikov, S.V. Kondratenko – M.: JeKOM, 2001. – 312 s.

2. Horiashchenko K.L. Ohliad system imitatsiinoho modeliuvannia telekomunikatsiinykh merezh / K.L. Horiashchenko, M.D. Dorotiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2014. Issue 5. P. 115-118.

3. Komp'juternye seti. Kniga 2: Networking Essentials. Jenciklopedija pol'zovatelja: per. s angl. / A. Mark, D. Sportak i dr. – K.: Izd-vo «DiaSoft», 1999. – 468 s.

4. UNetLab: List of supported images [Jelektronnyj resurs] / A. Dainese. URL: http://www.unetlab.com/documentation/supported-images/index.html – svobodnyj. – Zagl. s jekrana. – Jaz. Angl. Data obrashhenija: 16.03.2017 g.

5. Korporativnye seti svjazi / T.I. Ivanova. Posobie. – Moskva 2001, – 297 s.

6. Horiaschenko K.L., Voitiuk O.P., Kushniruk S.L., Shevchuk O.V. Implementation of PLC technologies. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2017. Issue 2. P. 250-253.

7. Zbaravskyi V.V., Horiashchenko K.L., Kovtun L.O. Realizatsiia kontseptsii Triple play v merezhi ADSL. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2012. Issue 2. P. 266-270.

8. Ispol'zovanie programmnyh sredstv jemuljacii oborudovanija pri modifikacii setevoj infrastruktury / E.F. Popov// Sbornik nauchnyh trudov po materialam vserossijskuju nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Novye tehnologii – neftegazovomu regionu». Tjumen', 2012.

9. Introduction to Cisco IOS Netflow:A Technical Overview / URL: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/ios-nx-os-software/ios- netflow/prod_white_paper0900aecd80406232.html – svobodnyj. – Zagl. s jekrana. – Jaz. Angl. Data obrashhenija: 16.03.2017 g.

10. Vychislitel'nye seti i setevye protokoly / D. Devis, D. Barber, U. Prajs – M.: Mir, 1982. – 562s.

Надійшла / Paper received : 09.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-39-44
УДК 621.391

І.С. ПЯТІН., Д.А. МАКАРИШКІН, О.В. ВОЄВОДКО
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ СИГНАЛУ У КАНАЛІ ПЕРЕДАЧІ

Передача інформаційного сигналу каналом зв'язку супроводжується додаванням адитивного білого гаусового шуму, дією промислових завад, атмосферних завад, тощо. Крім того, сигнал може мати додаткове зміщення частоти і фази, що обумовлене рухом приймача відносно передавача. Стаття присвячена дослідженню впливу перерахованих явищ на залежності кількості помилок у каналі зв'язку від відношення сигнал-шум. Проведено дослідження якості сузір'я і око-діаграм на вході приймача цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK при наявності зміщення фази у середовищі розповсюдження.

Ключові слова: адитивний білиш гаусовий шум, канал зв'язку , фазовий шум, спотворення.

I.S. PYATIN, D.A. MAKARYSHKIN, O.V.VOYEVODKO
Khmelnytskyi National University

SIMULATION OF SIGNAL DISTORTIONS IN THE TRANSMISSION CHANNEL

Abstract – The transmission of the information signal by the communication channel is accompanied by the addition of additive white Gaussian noise, the action of industrial interference, atmospheric interference; frequency and phase shift of the signal, which may be caused by the mutual movement of the antenna of the transmitter and receiver or the mismatch of their local oscillators, caused by the instability of the reference frequency sources; signal delay in the communication channel caused by the propagation of the signal from the transmitter antenna to the receiver antenna and in the feeder systems; fading caused by multi-beam propagation of the signal from the transmitter to the receiver, the phenomena of refraction in the atmosphere and reflections from various objects. The article is devoted to the study of the influence of the listed phenomena on the dependence of the number of errors in the communication channel on the signal-to-noise ratio. A study of the quality of constellations and eye diagrams at the input of the receiver of the digital communication system with QPSK modulation in the presence of phase and frequency shift in the propagation medium, the presence of phase noise, imbalance of the quadrature components of the signal. The main reasons for the deterioration of the quality of the communication channel are the reduction of the signal-to-noise ratio, phase and amplitude distortions. When processing and evaluating a digital signal, an important factor of quality is the parameter of intersymbol interference. Due to the imperfection of the components of the analog part of the communication system, there is an imbalance of in-phase and quadrature components of the signal. Insufficient suppression of the mirror channel causes deterioration of the modulus of the error vector in the receiver, which leads to an increase in the frequency of error bits. It is also necessary to take into account the deterioration of the signal due to the presence of thermal noise and signal attenuation due to the distance from the transmitter to the receiver.

Keywords: additive white Gaussian noise, communication channel, phase noise, distortion.

Постановка задачі

Останнім часом при побудові цифрових систем зв'язку, все більше функцій, що традиційно виконуються аналоговими пристроями, реалізуються на базі цифрових сигнальних процесорів (ЦСП). В поєднанні з додаванням ЦСП межа між аналоговим і цифровим сегментами систем зв'язку, що розділені АЦП, розташовується ближче до антени. Системи зв'язку стають програмно керованими.

Програмно кероване радіо (SDR) включає аналогові компоненти: антени, попередні фільтри, комутатори, попередні підсилювачі і підсилювачі потужності, та цифрові компоненти: GPP (процесор загального застосування); DSP (цифровий сигнальний процесор); FPGA (програмована користувачем матрична БІС); ASIC (спеціалізована інтегральна схема). З цими уніфікованими обчислювальними і керуючими вузлами можна реалізувати велику кількість різноманітних функцій, наприклад, модуляцію, демодуляцію, фільтрацію, кодування. Схема ASIC не програмується, а спеціально розробляється для кожного варіанту застосування. Для неї характерні низькі витрати на виробництво, невелика споживана потужність і висока продуктивність.

Матричні БІС (FPGA) незамінні в програмних радіопристроях, завдяки високій продуктивності і програмованості. Їх обчислювальна продуктивність набагато вище, ніж у DSP або GGP. Це обумовлено можливістю квазіпаралельної обробки даних. Основними перевагами DSP і GPP є їх програмованість і можливість перебудови конфігурації.

Аналіз досліджень та публікацій

У загальному випадку при проектуванні системи зв'язку необхідно враховувати такі основні фактори, що впливають на сигнал при його поширенні в каналі зв'язку [1]:

- вплив адитивного білого гаусового шуму (теплового шуму);
- частотне і фазове зміщення сигналу, що може бути викликане взаємним рухом антени передавача і приймача або неузгодженістю їх гетеродинов, викликане нестабільністю джерел опорної частоти;
- затримка сигналу в каналі зв'язку, що викликано розповсюдженням сигналу від антени передавача до антени приймача і в фідерних системах;
- завмирання, викликані багатопроменевим поширенням сигналу від передавача до приймача, явищами рефракції в атмосфері і перевідбиваннями від різних об'єктів.

При моделюванні систем зв'язку на персональному комп'ютері особливу увагу необхідно приділити питанням затримки сигналу в каналі зв'язку. Оскільки моделювання на комп'ютері принципово може бути тільки дискретним в області часу, для проведення коректних досліджень систем синхронізації приймального пристрою необхідно створювати дробову затримку в каналі зв'язку.

В системх передавання даних при неідеальному каналі зв'язку сигнали спотворюються, тому ці спотворення необхідно враховувати та при можливості коректувати. В каналі зв'язку (КЗ), як правило, діють різні види завад, а також мають місце лінійні і нелінійні спотворення сигналів [1].

Виділення невирішених частин

Розглянемо математичну модель сигналу на вході приймача. Нехай передавач формує цифрову інформацію за допомогою m сигналів $s(t)=\{s_m(t)\}$, де m - кількість точок у сигнальному сузір'ї цифрової модуляції [1]. Канал спотворює сигнал за допомогою адитивного білого гаусового шуму (АБГШ). Таким чином, сигнал на вході приймача на інтервалі $0 \le t \le T$ можна записати виразом [2]:

$$r(t) = s_m(t) + n(t),$$

де $n(t)$ означає реалізацію АБГШ з двобічною спектральною густиною потужності $\Phi_m(f) = N_0/2$.

Положимо, що на вхід узгодженого фільтра, за яким розташований пристрій дискретизації, надходить сигнал $r(t)$. Сигнал на виході узгодженого фільтра можна представити за допомогою передаточної функції фільтра $H(f)$ і спектральної густини сигналу на вході $S(f)$:

$$s_{y\phi}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)S(f)e^{j2\pi ft}df$$

Дисперсія шуму на виході σ_0^2 визначається виразом:

$$\sigma_0^2 = \frac{N_0}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\left|H(f)^2\right|df$$

Приймач складається з двох частин: демодулятор сигналу і детектор. Функція демодулятора складається у перетворенні сигналу $r(t)$ у вектор $r=\{r_1, r_{2,}, r_3, r_4\}$. Функція детектора полягає у вирішенні, який з можливих сигналів m був переданий [2].

У вказаних дослідженнях недостатній аналіз спотворень сигналу в каналі передачі при наявності частотного і фазового зміщення модульованого сигналу, фазового шуму, дисбалансу квадратурних складових сигналу. Стаття присвячена дослідженню впливу каналу зв'язку на якісні характеристики сигналу з QPSK: діаграму сузір'я модуляції і око-діаграму.

Спотворення сигналу у системі зв'язку

Величиною яка характеризує ефективність цифрової системи зв'язку є пропускна здатність [біт/с]. Пропускна здатність - це кількість інформації, яку можна передати в системі зв'язку в одиницю часу. Верхня межа пропускної здатності при заданому відношенні сигнал/шум і доступній смузі частот задається теоремою Шеннона [3]:

$$C = W \cdot \log_2\left(1+\frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

де C – пропускна здатність (біт/с); W – доступна ширина смуги пропускання системи (Гц), S – середня потужність прийнятого сигналу, N – середня потужність шуму. Врахуємо, що середня потужність шуму залежить від ширини смуги: $N = N_0 W$, де N_0 – спектральна густина потужності шуму. При дослідженні системи зав'язку будемо користуватись не відношенням сигналу до шуму, а величиною E_b/N_0 – відношенням енергії біта до густини потужності шуму, оскільки отримані при цьому співвідношення містять мінімальну кількість вторинних величин. З'ясуємо наступне: енергія біту – енергія, необхідна для передачі одного біта інформації, яку представимо як добуток потужності передавача на тривалість біта. Перетворимо співвідношення (1) до еквівалентного вигляду:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{C}\left(2^{C/W}-1\right) \quad (2)$$

та встановимо залежність C/W відношення пропускної здатності до доступної смуги від енергетичної характеристики системи – E_b/N_0. Встановлюємо чим більше E_b/N_0, тим більше інформації можна передати в одній і тій же смузі. Чим менше E_b/N_0, тим більша смуга потрібна для передачі однакової кількості інформації.

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM при передачі по каналу зв'язку з відношенням сигнал-шум 40 dB представлений на рис. 1.

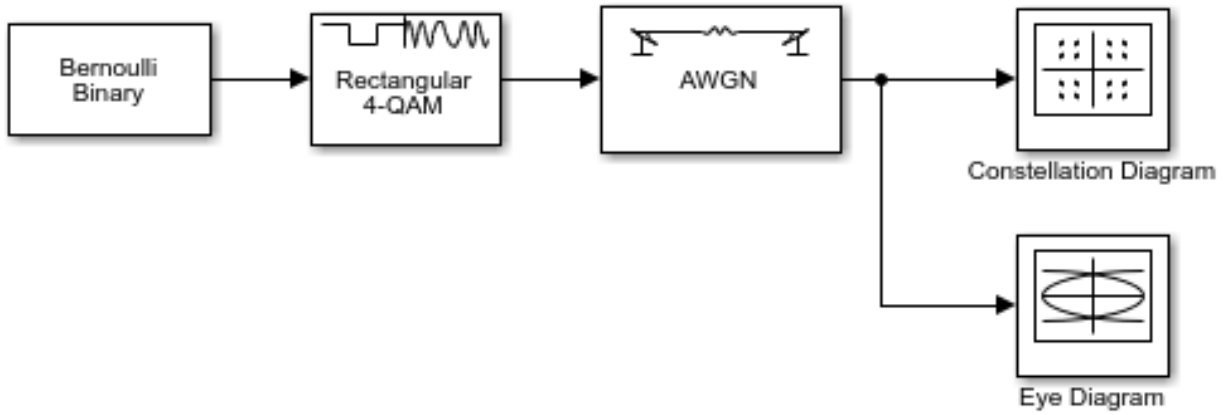


Рис. 1. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK

Сигнальне сузір'я (Constellation diagram) - відображення значень комплексної амплітуди модульованих радіосигналів на комплексній площині. Для моделі рис. 1, сигнальне сузір'я приведено на рис. 2. Око діаграма приведена на рис. 3.

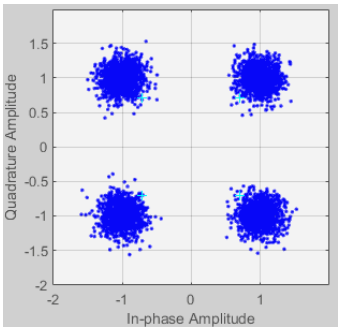


Рис. 2. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 1)

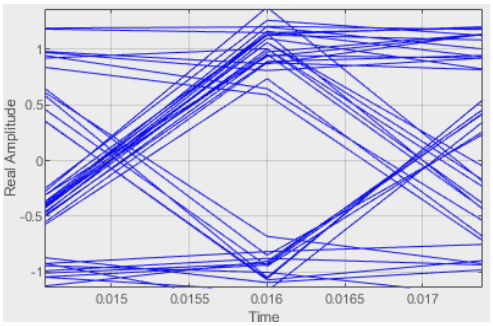


Рис. 3. Око діаграма моделі (рис.1)

Значення комплексної амплітуди радіосигналу представляються у вигляді точок на двовимірній діаграмі. На діаграмі показані всі значення, які можуть бути обрані даною схемою маніпуляції. Сигнальні сузір'я, отримані в результаті вимірювання комплексної амплітуди радіосигналу, можуть використовуватися для визначення типу маніпуляції, роду інтерференції і рівня спотворень.

Око-діаграма (eye diagram) - це поширений індикатор якості сигналів в високошвидкісних цифрових системах передачі. Осцилограф формує око-діаграму, накладаючи розгортки різних сегментів довгого потоку даних, керовані головним джерелом синхронізації. Фронт запуску може бути позитивним або негативним, але відображається імпульс, який з'являється після періоду затримки, може йти в будь-якому напрямку; немає способів заздалегідь дізнатися значення довільного біта. Отже, коли накладено багато таких переходів, позитивні і негативні імпульси накладаються один на одний. Накладання багатьох бітів дає око-діаграму.

В ідеальному випадку око-діаграми мають вигляд прямокутника. У реальності канали зв'язку не ідеальні, тому переходи не вирівняні один з одним, і в результаті виходить малюнок у формі ока. Форма око- діаграми на осцилографі буде залежати від різних типів сигналів запуску, таких як сигнал запуску з тактовою частотою потоку, сигнал запуску з поділеною тактовою частотою потоку, запуск по кодовій комбінації.

Причини помилок фази і частоти несучої: локальний генератор передавача, що використовуються для модуляції і перетворення з підвищенням частоти; локальний генератор приймача, що використовуються для перетворення з пониженням частоти і демодуляції; підвищуючі / понижуючі перетворювачі в повторювачах; доплерівській зсув частоти в мобільних каналах

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM і наявністю зміщення фази і частоти у каналі зв'язку приведений на рис. 4

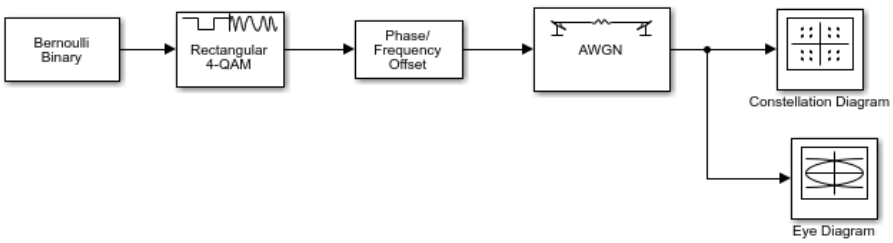


Рис. 4. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з наявністю зміщення фази і частоти в каналі передачі

Фазова помилка несучої відповідає повороту сузір'я: $\overline{A_k} = e^{j\varphi} A_k$.

Для моделі рис. 4, сигнальне сузір'я приведено на рис. 5. Око діаграма приведена на рис. 6.

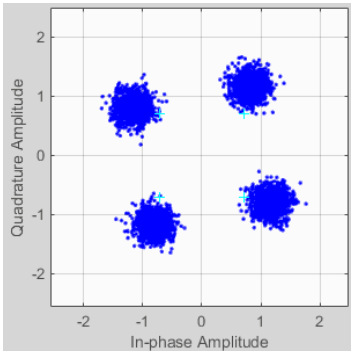


Рис. 5. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 4) з наявністю Phase Offset=10°

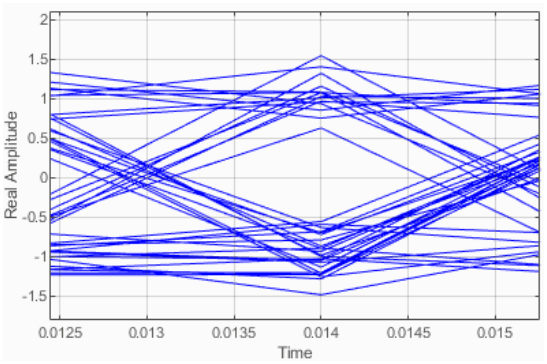


Рис. 6. Око діаграма моделі (рис.4) з наявністю Phase Offset=10°

Наявність зміщення частоти Frequence Offset=0,0001викликає обертання сузір'я проти годинникової стрілки. Для моделі рис. 4 в цьому випадку сигнальне сузір'я приведено на рис. 7. Око діаграма – на рис. 8.

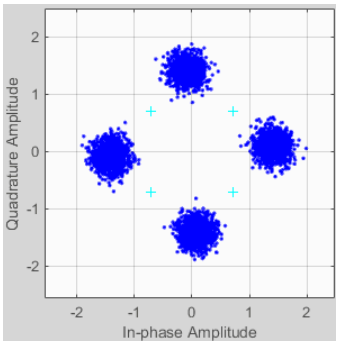


Рис. 7. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 4) з наявністю Frequence Offset=0,0001

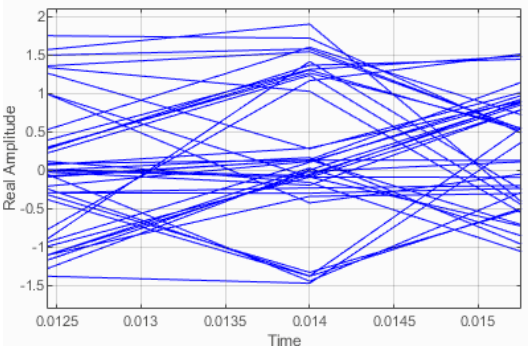


Рис. 8 Око діаграма моделі (рис.4)

Помилка несучої частоти $\Delta\omega$ відповідає обертанню сузір'я в часі $\overline{A_k} = e^{jkT\Delta\omega} A_k$.Ці ефекти можуть бути компенсовані комплексним множником, що додається при обробці радіосигналу.

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM і додаванням фазового шуму у каналі передачі приведений на рис. 9

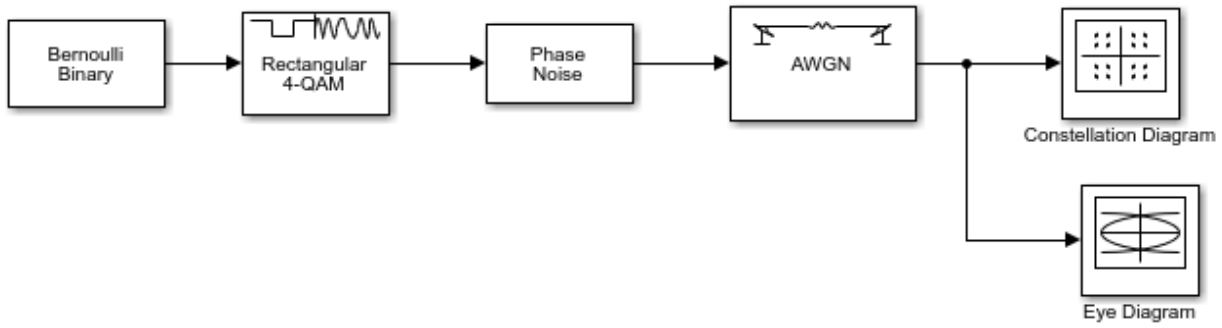


Рис. 9. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з наявністю фазового шуму

Блок Phase Noise додає фазовий шум до комплексної згинаючої вузькосмугового сигналу.

Параметри фазового шуму:

Phase noise level [-60, -80] dBc/Hz; Frequency offset [20, 200] Hz; Sample rate 1024 Hz; Initial seed 2137.

Для моделі рис. 9, сигнальне сузір'я приведено на рис. 10. Око діаграма приведена на рис. 11.

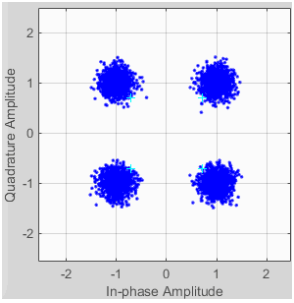


Рис. 10. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 9)

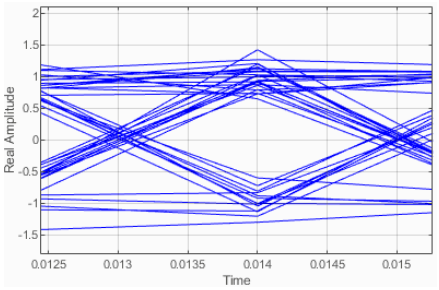


Рис. 11. Око діаграма моделі (рис.9)

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM при передачі по каналу зв'язку з відношенням сигнал-шум 40 dB і наявністю I/Q Imbalance приведений на рис. 12.

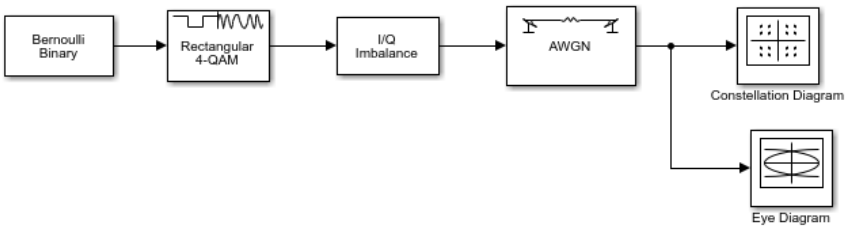


Рис. 12. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з наявністю дисбалансу квадратурних складових сигналу

Метод безпосередньої модуляції з використанням комплексних сигналів все частіше застосовується при реалізації сигнальних трактів передавачів в базових станціях систем стільникового зв'язку, системах WiMAX, бездротових системах, тощо. Даний метод полягає в безпосередній модуляції високочастотної несучої квадратурними (IQ) сигналами з виходу цифро-аналогового перетворювача (архітектура прямого перетворення), що позбавляє від необхідності в проміжному каскаді ПЧ і супутніх схемах фільтрації.

Для моделі рис. 12 при amplitude Imbalance 10 dB, сигнальне сузір'я приведено на рис. 13. Око діаграма приведена на рис. 14.

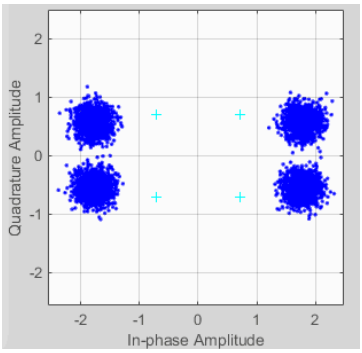


Рис. 13. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 12)

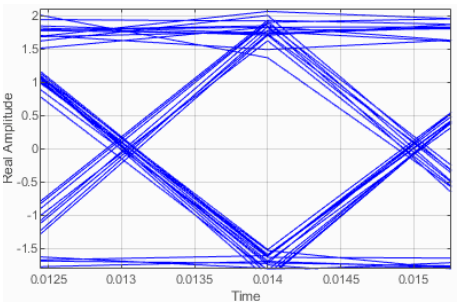


Рис. 14. Око діаграма моделі (рис.12)

Через неідеальність компонентів аналогової частини системи зв'язку з'являється дисбаланс синфазної і квадратурної складових сигналу. Передбачається, що в цифровій області квадратурні сигнали ідеально узгоджені. Таким чином, обговорювані джерела неузгодженості мають місце тільки в аналоговій частині сигнального тракту.

Висновки

Проведено дослідження якості сузір'я і око-діаграм на вході приймача цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK при наявності частотного і фазового зміщення модульованого сигналу, фазового шуму. Енергетична ефективність не когерентної цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK при виникненні фазового зміщення 30^0 у середовищі розповсюдження зменшується на 10 дБ. Наявність зміщення частоти суттєво впливає на енергетичну ефективність системи зв'язку. Енергетична ефективність цифрової системи зв'язку зменшується на 10 дБ при виникненні зміщення частоти 0,1 Гц і відсутності символьної синхронізації. Наявність зміщення фази у каналі зв'язку приводить до повороту сигнального сузір'я, наявність зміщення частоти – до обертання сигнального сузір'я цифрової модуляції проти годинникової стрілки. Через неідеальність компонентів аналогової частини системи зв'язку з'являється дисбаланс синфазної і квадратурної складових сигналу з цифровою модуляцією. В цифровій області квадратурні сигнали узгоджені. Недостатнє придушення дзеркального каналу викликає погіршення модуля вектора помилки (Error Vector Magnitude, EVM) в приймачі, що, призводить до підвищення частоти появи

помилкових бітів (BER).

Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Б. Скляр. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

2. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис. Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

3. Кичак В.М. Оцінка впливу кількісних характеристик зміни інформаційного параметра на завадостійкість каналів зв'язку з КАМн //Вісник Хмельницького національного університету №4, 2012. С. 59-62

4. Кичак В.М. Оцінювання бітових помилок при різних видах демодуляції дискретних сигналів /В.М. Кичак, В.Д. Тромсюк //Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. - №63. С. 55-63.

References

1. Sklyar B. Tsifrovaia sviaz. Teoreticheskie osnovi i prakticheskoe primenenie / B. Sklyar. Izd. 2-e, ispr.: Per. s angl. – M.: Izdatelskiy dom «Viliams», 2003. – 1104 s.

2. Procis D. Tsifrovaia sviaz / D. Procis. Per. s angl./ Pod red. D.D. Klovskogo. – M.: Radio i sviaz, 2000. – 800 s.

3. Kichak V.M. Otsinka vplyvu kilkisnykh kharakteristik zminy informatsiyinogo parametra na zavadostiyikist kanaliv zvyazku z QAM // Visnyk KHNY. Tekhnichni nauky №4, 2012 – S. 59-62.

4. Kichak V.M. Otsiniyvannia bitovykh pomylok pry riznykh vydakh demoduliatsii dyskretnykh sygnaliv / V.M. Kichak, V.D. Tromsiuk //Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu Ukrainy "KPI". Seriia – Radiotekhnika. Radioaparatebuduvannia/ - 2015. – N63. S. 55-63.

Надійшла / Paper received : 16.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-45-50
УДК 004.75:004.8:004.49

А.С. КАШТАЛЬЯН, Б.О. САВЕНКО, В.І. ГРИБИНЧУК
Хмельницький національний університет

МОДЕЛІ ТА ТИПИ ПРИМАНОК ДЛЯ ЗЛОВМИСНИХ АТАК В КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

В статті розроблені моделі приманок, мереж приманок та аналіз особливостей типів приманок дають змогу вибудувати систему хибних об'єктів атак, інтегровану в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки. Моделі приманок та мереж приманок є основою для розробки принципово нових методів виявлення зловмисного втручання в функціонування корпоративних мереж. Особливістю є досягнення за рахунок конфігурування різних типів приманок та їх інтеграції не тільки з іншими системами забезпечення рівня безпеки корпоративних мережах і за рахунок їх представлення в багаторівневій системі, яка за своєю архітектурою буде здійснювати ефективну реакцію на зловмисні події. В роботі представлено типові особливості приманок та враховано їх в розроблених формалізованих представленнях моделей приманок і їх мереж. Результати експериментальних досліджень представлені на основі характеристики побудованої мережі приманок в багаторівневій системі, яка динамічно змінюватиме свою конфігурацію та матиме систему прийняття рішень для оперативного реагування на події, що протікатимуть в мережі. В роботі показано застосування приманок як перспективний напрям у боротьбі із зловмисними втручаннями в роботу корпоративних мереж, інформація про які обмежена або відсутня. Розроблені в роботі моделі приманок та мереж приманок дають змогу вибудувати систему хибних об'єктів атак, інтегровану в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки.

Ключові слова: *мережа приманок, зловмисні дії, виявлення комп'ютерних атак, прогнозування, корпоративні комп'ютерні мережі.*

A. S. KASHTALIAN, B. O. SAVENKO, V. I. GRIBINCHOOK
Khmelnytskyi National University

MODELS AND TYPES OF Honeypots FOR MALICIOUS ATTACKS IN CORPORATE COMPUTER NETWORKS

The models of baits, bait networks and analysis of the features of the types of baits developed in the article make it possible to build a system of false objects of attack, integrated into the general security system of corporate networks, which will generally improve security. Models of lures and bait networks are the basis for the development of fundamentally new methods of detecting malicious interference in the functioning of corporate networks. This is achieved by configuring different types of lures and integrating them not only with other systems to ensure the level of security of corporate networks and by presenting them in a multilevel system, which by its architecture will effectively respond to malicious events. The paper presents typical features of baits and takes them into account in the developed formalized representations of bait models and their networks. The results of experimental research are presented on the basis of the characteristics of the constructed network of lures in a multilevel system, which will dynamically change its configuration and have a decision-making system for rapid response to events occurring in the network. The paper shows the use of baits as a promising direction in the fight against malicious interference in the work of corporate networks, information about which is limited or absent. The models of lures and lure nets developed in the work allow to build a system of false objects of attack, integrated into the general security system of corporate networks, which will generally help to improve the level of security.

Keywords: *honeynet, malicious actions, detection of computer attacks, forecasting, corporate computer networks.*

Вступ. Постановка проблеми

Використання комп'ютерних мережних ресурсів в роботі підприємств (організацій) стало невід'ємною частиною забезпечення технологічних процесів, що протікають в них. Але комп'ютерні мережі мають такі особливості, що будучи під'єднаними до мережі Internet стають об'єктами для зловмисних дій [1]. Для виявлення зловмисних дій та захисту від них використовується багато різного типу та призначення систем. Зокрема, захист інформаційних ресурсів мереж вирішуються за допомогою брандмауерів (firewall), антивірусів, систем виявлення атак (Intrusion Detection System, IDS), систем контролю цілісності, криптографічних засобів захисту [2].

Існуючі системи забезпечення захисту корпоративних мереж не забезпечують надійного захисту. Тому, актуальним напрямом дослідження є пошук більш ефективних шляхів виявлення зловмисних дій в роботі мережі. Основною вимогою до таких підходів є можливість виявлення будь-яких типів зловмисних втручань, в тому числі і нових, а також впливів, розподілених у часі. Перспективним напрямом для виявлення нових типів загроз є використання окремих приманок та їх приманок в комп'ютерних мережах, а також їх інтеграція з іншими системами захисту. Метою дослідження є розробка моделей приманок та їх мереж на основі аналізу їх типів та особливостей застосування.

1. Методи виявлення зловмисних дій на основі приманок та мереж приманок

Приманки у локальних мережах та мережі Інтернет виконують функції збору та аналізу інформації щодо зловмисних дій в мережах [3–5]. Актуальними напрямами дослідження є розміщення приманок саме в

корпоративних мережах для покращення безпеки в них. Розглянемо методи побудови таких приманок, які орієнтовані саме на використання в корпоративних комп'ютерних мережах підприємств (організацій).

В роботах [6, 7] приведено результати використання мережі, що містить невелику кількість низькорівневих приманок, які дозволяють здійснювати пряме вимірювання атак та їх походження. Висновок здійснюється на основі статистичного аналізу.

Приманки описані в [7] двох типів: низькорівневі та високорівневі, які призначені для виявлення загроз сервісам з операційними системами Linux та Windows. Вони є клієнтські та серверні і реалізовані на різних мовах програмування. Перспективним спрямування використання приманок авторами пропонується ряд додаткових інструментів, дотичних до приманок, зокрема інструменти, що розширюють функціональність приманок та мереж та інструменти для виявлення приманок.

Використання тіньових приманок пропонується в [8, 9]. Вони представляють собою гібридну архітектуру, що поєднує ознаки приманок та систем виявлення втручань. Тіньова приманка розділяє всі внутрішні стани робочого сервісу і здатна виявляти потенційні загрози. Таким чином, атаки підтверджені приманкою, відфільтровуються, а нормальний трафік, помилково класифікований як аномальний, опрацьовується коректно. Вихідні дані з тіньової приманки надалі використовуються для подальшого вдосконалення систем виявлення втручань, зменшуючи кількість хибно позитивних результатів.

Метод на основі застосування приманок до виявлення зловмисних дій, який змінює їх пасивну роль очікування атак на активне ефективне використання у взаємодії приманок та мережі, в якій вони розгорнуті, запропоновано в роботі [10]. Це передбачає розпізнавання зловмисних дій на їх початковому етапі та перенаправлення мережного трафіку на приманку до того як зловмисні дії завдадуть реальної школи.

Віртуалізація відіграє значну роль в останніх трендах хмарних обчислень та зберігання даних, що ускладнює задачу одночасного надання якісного сервісу та захисту від втручань. Використання приманок у віртуальних середовищах для попередження зловмисних дій та реагування на них запропоновано в [11]. Віртуальні приманки та мережі віртуальних приманок дозволяють зменшити витрати у порівнянні з фізичними приманками [12].

Підключення локальних пристроїв різноманітних пристроїв, в тому числі це стосується інтернету речей до таких мереж несе в собі загрозу не тільки доступу до даних, а також безпосереднього втручань в роботу цих пристроїв. Для збереження конфіденційності інформації та запобігання втручань в роботу використовуються приманки [13].

Приманки можуть бути ідентифіковані зловмисниками з використанням різних методів [13]. Ці підходи досліджуються та моделюються з метою захисту та здійснення контрзаходів щодо виявлення приманок [15, 16]. Для автоматичної ідентифікації приманок використовуються сучасні методи, в тому числі методи машинного навчання, такі як дерева рішень та випадковий ліс [17].

2. Відомі типи приманок для виявлення зловмисних дій та їх моделі

Розглянемо типи розповсюджених приманок для виявлення зловмисних в комп'ютерних мережах. Побудуємо моделі приманок на основі групування і узагальнення їх характеристик з метою створення мереж приманок в корпоративних комп'ютерних мережах для покращення рівнів безпеки в них.

В табл. 1 надано рівні роботи приманок з урахуванням її функцій.

Таблиця 1

Рівні роботи приманок

Рівень	Виконувані функції
Рівень виявлення	Збір мережного трафіку, повідомлення виявлення приманки зловмисником
Рівень аналізу	Аналіз та оцінка дій зловмисника, аналіз виявлення приманки зловмисником
Рівень реагування	Реагування на дії зловмисника
Рівень виконання	Виявлення атак, попередження зловмисних дій

Рівень виявлення забезпечує збір інформації щодо втручань в роботу сервісу. До цієї інформації відносяться дані щодо виявлення приманки зловмисником, виявлення портів, що прослуховують сервер, виявлення неавторизованих облікових записів, виявлення файлів, заміщених зловмисником і т.п.

На рівні аналізу зібрана інформація аналізується, визначається яка саме зафіксована активність є зловмисною та визначається рівень її небезпеки для мережі. Рівень небезпеки зловмисних дій асоціюється з рівнем шкоди, що може бути завдана мережі. Наприклад, чи були зафіксовані дії неавторизованих користувачів, модифікації файлів тощо.

На рівні реагування формуються правила попередження та виявлення атак, сформовані на основі зібраної та проаналізованої інформації, які надалі використовуються мережею.

Рівень виконання поєднує дві основних функції. На етапі виявлення за відомими характеристиками (сигнатурами) виявляються атаки мережі на основі статичних патернів. На етапі попередження ці атаки блокуються як зловмисні.

Процес збору та аналізу інформації та реагування є неперервним. Правила виявлення динамічно оновлюються на основі інформації рівня виявлення та аналізу, що дозволяє постійно реагувати на нові види зловмисних дій та їх модифікації.

Задамо модель приманки на основі функцій, які вона виконує, та відношення «багато до одного». В

даному відношенні приманка виступає одиничним об'єктом до якого можуть спрямовуватись атаки з різних джерел. Нехай Р – множина, яка позначає сукупність функцій приманки, причому функції можуть відноситись до різних рівнів і можуть дублюватись. Введемо операції на множині Р, суть яких полягатиме в поєднанні модулів приманки різного призначення. Множина таких операцій на множині Р надає можливість представляти модель приманки на основі функцій, з яких вона утворюється та врахувати різноманіття таких функцій. Позначимо цю множину Ω_P. Введемо множину предикатів Ω_I на множині P, які будуть істинними якщо операції з множини Ω_P виконуватимуться. Тоді задамо алгебраїчну структуру $\mathfrak{A}_P$ типу $\tau = (1, 1)$, яка поєднає всі розглянути множини для формування формалізованого представлення приманки:

$$\mathfrak{A}_P = \langle P, \Omega_P, \Omega_I \rangle, \quad (1)$$

де P – множина, яка позначає сукупність функцій приманки; Ω_P – множина таких операцій на множині Р; Ω_I – множину предикатів на множині P.

Тоді модель приманки, яка враховуватиме функції з яких вона формуватиметься, задамо так:

$$\mathfrak{W}_P = \langle P, \Omega_I \rangle, \quad (2)$$

де P – множина, яка позначає сукупність функцій приманки; Ω_I – множину предикатів на множині P.

Розглянемо типи приманок за їх різними характеристиками. В табл. 2 відображено основні типи приманок та їх коротку характеристику.

Таблиця 2

Характеристика типів приманок

За використанням	
Виробничі (продукційні) приманки	Призначені для використання в реальних виробничих середовищах. Розташовуються всередині виробничої мережі з іншими виробничими серверами для підвищення загального рівня безпеки. Виробничі приманки є простими у використанні, потребують менше функціональності, ніж дослідницькі приманки, але й надають менше інформації про атаки та зловмисників.
Дослідницькі приманки	Основною метою використання цього типу приманок є збір та дослідження інформації щодо зловмисних втручання. Такі приманки безпосередньо не підвищують рівень безпеки середовища, в якому працюють. Натомість вони досліджують загрози, з якими стикається система, для подальшого захисту від них. Дослідницькі приманки зазвичай є складними у створенні та розгортанні. Однак відслідковують більше типів атак та надають про них більше інформації.
За рівнем взаємодії	
Низького рівня взаємодії	Такий тип приманок характеризується мінімальною взаємодією з зловмисниками. Приманки не мають реальної операційної системи чи сервісів, тільки емулюють роботу певних серверів, наприклад, ftp або http. Відповідно, такі приманки є простими в розгортанні та підтримці, але відслідковують обмежену кількість дій зловмисників. Окремим підтипом є тіньові приманки, які працюють у взаємодії з системою виявлення втручань. Якщо система виявлення втручань виявляє атаку, то виявлений аномальний трафік перенаправляється на приманку замість блокування для подальшого аналізу.
Середнього рівня взаємодії	Приманки цього типу поєднують властивості приманок низького та високого рівнів взаємодії. Приманки також не мають реального середовища, але забезпечують відповіді на запити зловмисників за рахунок рівня віртуалізації. Це дозволяє отримувати більше інформації про зловмисників. Приманки є більш складними у розгортанні.
Високого рівня взаємодії	Такі приманки мають реальну операційну систему, забезпечують високий рівень взаємодії і мають характеристики реального сервісу, що приваблює зловмисників. Тому, такі приманки дозволяють зібрати найбільше інформації про втручання і в більшості використовуються як дослідницькі, особливо при визначенні нових загроз. Розгортання і підтримка таких приманок є найбільш складною у порівнянні з іншими типами.
За типом розгортання обладнання	
Фізичні приманки	Фізична приманка представляє собою окремий комп'ютер із запущеною операційною системою та сервісами, з якої приманка приєднана до мережі через одну IP адресу. Фізичні приманки є дорого вартісні та дещо обмежені через одну IP адресу. В більшості випадків фізичні приманки є дослідницькими.
Віртуальні приманки	Віртуальні приманки можуть розташовуватися на одній фізичній машині з іншими сервісами. Можливе розташування декількох віртуальних приманок на одній машині. Завдяки цьому віртуальні приманки відслідковують більшу кількість IP адрес та є дешевшими в розгортанні.
За роллю приманки	
Пасивні (Server Side)	Звичайні приманки є пасивними і не ініціюють обміну даними крім випадків відповідей на атаки зловмисника. Такі приманки доцільні при виявленні атак різного типу, збиранні та дослідженні інформації про втручання.
Активні (Client Side)	Метою активних приманок є пошук та виявлення зловмисних серверів. Попереднє виявлення зловмисних серверів дозволяє захистити вразливі додатки клієнта.

Для захисту комп'ютерної мережі системою приманок передбачається, що їх розташовують у місцях можливого зловмисного втручання. Відносно комп'ютерної мережі можна виділити зовнішнє розташування приманок, внутрішнє та в зоні ДМЗ. На рис. 1 зображена типова багаторівнева система приманок, яка включає множину інтелектуальних приманок, що виконують постійний моніторинг мережі.

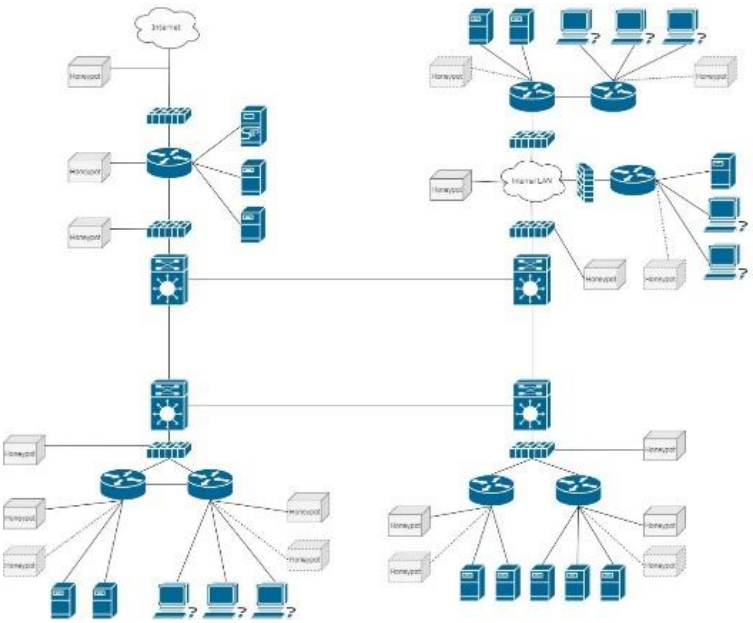


Рис. 1. Мережа з системою приманок

Така типова багаторівнева система приманок включає наступні типи приманок:

1. Зовнішні приманки, приєднані безпосередньо до мережі інтернет перед брандмауером. Ця приманка має найвищий рівень взаємодії, представляє собою фізичний сервіс з операційною системою, який емулює роботу реальних сервісів та відповідає на запити зловмисників. За рахунок цього, а також за рахунок розташування приманки у місці без будь якого захисту від втручань, приманка дає можливість зібрати максимально можливий об'єм інформації про дії зловмисників.

2. Приманки, розташовані в зоні ДМЗ. Ці приманки є фізичними і віртуальними, в залежності від їх кількості. Фізичні приманки працюють постійно під час роботи мережі. Віртуальні приманки можуть бути статичними і динамічними. Статичні приманки, так само як фізичні, працюють постійно. Динамічні приманки працюють підключаються за необхідності, якщо є потреба виявляти додаткові загрози або отримати більше інформації про дії зловмисників.

3. Основна множина приманок розташована всередині мережі і призначена для моніторингу безпеки сервісів та пристроїв підключених до мережі, в тому числі до внутрішньої локальної мережі. Так само як і в зоні ДМЗ всередині мережі використовується множина статичних та динамічних приманок, серед яких є фізичні та віртуальні.

Кількість статичних приманок та їх розташування в мережі фіксована.

Система приманок є мережею із своєю архітектурою та власною системою сервісів та фактично вбудована в мережу робочих сервісів, що значно підвищує контрольованість та захищеність системи в цілому. Елементами роботи мережі приманок є контроль даних, захоплення даних та збір даних.

Контроль даних системою приманок призначений зменшувати ризики здійснення атак щодо робочих сервісів, розміщених в мережі. Основною метою контролю дій зловмисника є швидке та ефективне реагування на них. Крім того, зловмиснику не повинно бути відомо, що його дії контролюються. Для зменшення ризиків система приманок повинна відповідати таким вимогам: контроль мережі має поєднувати ручний та автоматичний; для захисту від втручань необхідно щонайменше два рівні контролю даних; можливість підтримувати всі вхідні та вихідні з'єднання; можливість контролювати будь-яку несанкціоновану активність; здійснення контролю даних повинно конфігуруватися адміністратором в будь-який час; контроль зв'язку адміністратором повинен складно відслідковуватися зловмисником; наявність щонайменше двох методів попередження про зловмисну активність; можливість віддаленого адміністрування контролю даних; захоплення даних є наступною вимогою до мережі приманок і критично важливим є те, що захоплення активності приманкою має бути невідоме зловмиснику.

До захоплення даних мережею приманок висуваються такі вимоги: дані, захоплені приманкою, не зберігаються нею локально для того, щоб зловмисник не мав до них доступу; будь-який вплив інший даних не повинен впливати на процес захоплення даних приманкою; до активностей, які повинні відслідковуватися та фіксуватися, відносяться активності мережі, системи, додатків та користувачів; адміністратор повинен мати можливість віддалено відслідковувати роботу мережі приманок у реальному часі; захоплені дані повинні автоматично зберігатися для подальшого аналізу; інформація про захоплені дані повинна підтримуватися для кожної приманки мережі; адміністратор повинен виконувати оновлення приманок, які виявлені зловмисником; повинна забезпечуватися цілісність даних, захоплених мережею приманок.

Збір даних мережею приманок призначений для подальшого їх аналізу та інтеграції з даними про зловмисні дії, отримані з інших джерел. Ця інформація використовується для поточного та подальшого запобігання атакам. Для збору даних до мережі приманок висуваються вимоги: кожна приманка має унікальний ідентифікатор для взаємодії з мережею; можливість анонімізації даних, що стосуються приманок в мережі; обмін даними виконується із забезпеченням конфіденційності та цілісності даних; стандартизація

та синхронізація обміну захопленими даними всередині мережі приманок.

Розглянута мережа може виконувати функцію поточного та перспективного захисту мережі від ряду зловмисних втручань, в тому числі від автоматизованих (автоматичних) атак та персоналізованих втручань.

Задамо модель мережі приманок на основі функцій, які вона виконує, та відношення «багато до багато» з використанням моделі (формула (1)). Модель мережі приманок, яка враховуватиме багаторівневість системи, в які вони використовуватимуться, задамо так:

$$\mathfrak{W} = \bigcup_P \mathfrak{W}_P, \quad (3)$$

де P – множина, яка позначає сукупність функцій приманки; $\mathfrak{W}_P$ – моделі приманок, сформовані з елементів множини P.

Розроблені моделі приманок, мереж приманок та аналіз особливостей типів приманок дають змогу вибудувати систему хибних об'єктів атак, інтегровану в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки. Моделі приманок та мереж приманок є основою для розробки принципово нових методів виявлення зловмисного втручання в функціонування корпоративних мереж. Це досягається за рахунок конфігурування різних типів приманок та їх інтеграції не тільки з іншими системами забезпечення рівня безпеки корпоративних мереж а і за рахунок їх представлення в багаторівневій системі, яка за своєю архітектурою буде здійснювати ефективну реакцію на зловмисні події.

3. Постановка експериментів з багаторівневою системою мережі приманок

Для розробки мереж приманок орієнтованих на використання в корпоративних мережах підприємств (організацій) необхідно розв'язати наступні задачі: встановити типові корпоративні мережі для яких буде використано пропоновану мережу приманок; визначитись із засобами захисту мережі, які будуть використовуватись; вибрати набір приманок різних типів для конфігурування мережі приманок; конфігурувати набір приманок в багаторівневу систему; провести узгодження взаємодії та уникнення конфліктів між стандартними використовуваними засобами захисту мережі та мережею приманок; здійснити активацію мережі приманок; провести первинне тестування стандартним набором тестів.

Проведення експериментальних досліджень з розробленою мережею приманок проводилось протягом тривалого часу (6 місяців) і мало на меті порівняння результатів з тими, які отримались без використання мережі приманок. Відсоткове покращення інтегрованого рівня безпеки в корпоративній мережі становило 3%. Його збільшення в перспективі є можливим за рахунок уточнення та покращення моделей приманок та комп'ютерних атак, а також покращення взаємодії компонентів багаторівневої системи.

Результати експериментальних досліджень дозволяють здійснити побудову мережі приманок, які динамічно змінюватимуть свою конфігурацію та матимуть систему прийняття рішень для оперативного реагування на події, що протікатимуть в мережі.

Висновки

Застосування приманок є перспективним напрямом у боротьбі із зловмисними втручаннями в роботу корпоративних мереж, інформація про які обмежена або відсутня. Розроблені моделі приманок та мереж приманок дають змогу вибудувати систему хибних об'єктів атак, інтегровану в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки. Результати експериментальних досліджень дозволяють здійснити побудову мережі приманок.

Напрямками подальших досліджень є удосконалення системи підтримки прийняття рішень в багаторівневій системі, яка включає в себе приманки, та покращення моделей приманок.

Література

1. Савенко О. С. Дослідження методів антивірусного діагностування комп'ютерних мереж / О. С. Савенко, С. М. Лисенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 2, т. 2. – С. 120–126.

2. Савенко О.С. Моделі незадокументованих закладок програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах / О.С. Савенко, В.П. Паюк, Б.О. Савенко, А.С. Каштальян // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2019. – № 2. – С. 84–90.

3. Data Collection and Data Analysis in Honeypots and Honeynets. Pavol Sokol, Patrik Pekarčík, Tomáš Bajtoš. URL: http://spi.unob.cz/papers/2015/2015-19.pdf [Access 18.04.2020].

4. Study of Internet Threats and Attach Methods Using Honeypots and Honeynets. Tomas Sochor, Matej Zuzcak - Springer International Publishing Switzerland 2014, A. Kwiecie´n, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): CN 2014, CCIS 431, p. 118–127, 2014.

5. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection. Tomas Sochor, Matey Zuzcak – Springer International Publishing Switzerland 2015, P.Gaj at al. (Eds.): CN 2015, CCIS 522, p. 69-81, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19419-6 7.

6. A Survey on Honeypot Software and Data Analysis. Marcin Nawrocki, Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, Christian Keil, Jochen Schönfelder. arXiv:1608.06249v1 [cs.CR] 22 Aug 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1608.06249 [Access 26.03.2020]

7. Composite Hybrid Techniques for Defending Against Targeted Attacks. S. Sidiroglou, A.D. Keromytis. Part of the Advanced in Information Security book series (ADIS, volume 27), 2007, 213-229 p.

8. Shadow Honeypots. K.G. Anagnostakis, S. Sidiroglou, M. Polychronakis, A.D. Keromytis, P. Markatos. International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 9, September 2010, 16 p.

9. POSTER: Dragging Attackers to Honeypots for Effective Analysis of Cyber Threats. Martin Husak, Jan Vykopal. URL: https://is.muni.cz/repo/1188174/POSTER-Dragging_Attackers_to_Honeypots_for_Effective_Analysis_of_Cyber_Threats.pdf [Access 30.05.2020]

10. Effective Proactive and Reactive Defense Strategies against Malicious Attacks in a Virtualized Honeynet. Frank Yeong-Sung Lin, Yu-Shun Wang, Ming-Yang Huang. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 518213, 11 pages. URL: https://www.hindawi.com/journals/jam/2013/518213/ [Access 10.04.2020]

11. A Virtual Honeypot Framework. Niels Provos. URL: http://www.citi.umich.edu/u/provos/papers/honeyd.pdf [Access 12.04.2020]

12. Securing Internet of Things (IoT) Using HoneyPots. Sai Sudha Gadde, Rama Krishna Srinivas Ganta, ASALG Gopala Gupta, Raghava Rao K, KRR Mohan Rao. International Journal of Engineering & Technology, 7 (2.7), 2018, p. 820–824.

13. Enhancing Honeypot Deception Capability Through Network Service Fingerprinting. R.N. Dahbul, C. Lim, J. Purnama. Internation Conference on Computing and Applied Informatics 2019, Journal of Physics: Conf. Series 801. 2017.

14. Probabilistic Estimation of Honeypot Detection in Internet of Things Environment. O. Surnin, F. Hussain, R. Hussain, S. Ostrovskaya, A. Polovinkin, J.Y. Lee, X. Fernando. 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, 18-21 Feb. 2019, 191–196 p.

15. Automatic Identification of Honeypot Server Using Machine Learning Techniques. Cheng Huang, Jiaxuan Han, Xing Zhang, Jiayong Liu. Hindawi, Security and Communication Networks Volume 2019, Article ID 2627608, 8 pages.

16. Survey of Attach Projection, Prediction, and Forecasting in Cyber Security. Martin Husak, Jana Komarkova, Elias Bou-Harb, Pavel Celeda. IEEE Communication Survays & Tutorials – September 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/327449459_Survey_of_Attack_Projection_Prediction_and_Forecasting_in_Cyber_Security [Access 12.05.2020]

17. Honeypots and Routers: Collecting Internet Attacks. Mohssen Mohammed, Habib-ur Rehman – CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2016. 197 p.

References

1. Savenko O.S. Research of methods of antiviral diagnostics of computer networks / O.S. Savenko, S.M. Lysenko // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. - 2007. - № 2, v. 2. - P. 120–126.

2. Savenko O.S., Payuk V.P., Savenko B., Kashtalyan A.S. Models of undocumented software bookmarks in local computer networks. Measuring and computing equipment in technological processes. 2019. № 2. P.84-90.

3. Data Collection and Data Analysis in Honeypots and Honeynets. Pavol Sokol, Patrik Pekarčík, Tomáš Bajtoš. URL: http://spi.unob.cz/papers/2015/2015-19.pdf [Access 18.04.2020].

4. Study of Internet Threats and Attach Methods Using Honeypots and Honeynets. Tomas Sochor, Matej Zuzcak - Springer International Publishing Switzerland 2014, A. Kwiecie´n, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): CN 2014, CCIS 431, pp. 118–127, 2014.

5. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection. Tomas Sochor, Matey Zuzcak – Springer International Publishing Switzerland 2015, P.Gaj at al. (Eds.): CN 2015, CCIS 522, pp. 69-81, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19419-6 7.

6. A Survey on Honeypot Software and Data Analysis. Marcin Nawrocki, Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, Christian Keil, Jochen Schönfelder. arXiv:1608.06249v1 [cs.CR] 22 Aug 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1608.06249 [Access 26.03.2020]

7. Composite Hybrid Techniques for Defending Against Targeted Attacks. S. Sidiroglou, A.D. Keromytis. Part of the Advanced in Information Security book series (ADIS, volume 27), 2007, 213-229 pp.

8. Shadow Honeypots. K.G. Anagnostakis, S. Sidiroglou, M. Polychronakis, A.D. Keromytis, P. Markatos. International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 9, September 2010, 16 p.

9. POSTER: Dragging Attackers to Honeypots for Effective Analysis of Cyber Threats. Martin Husak, Jan Vykopal. URL: https://is.muni.cz/repo/1188174/POSTER-Dragging_Attackers_to_Honeypots_for_Effective_Analysis_of_Cyber_Threats.pdf [Access 30.05.2020]

10. Effective Proactive and Reactive Defense Strategies against Malicious Attacks in a Virtualized Honeynet. Frank Yeong-Sung Lin, Yu-Shun Wang, Ming-Yang Huang. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 518213, 11 pages. URL: https://www.hindawi.com/journals/jam/2013/518213/ [Access 10.04.2020]

11. A Virtual Honeypot Framework. Niels Provos. URL: http://www.citi.umich.edu/u/provos/papers/honeyd.pdf [Access 12.04.2020]

12. Securing Internet of Things (IoT) Using HoneyPots. Sai Sudha Gadde, Rama Krishna Srinivas Ganta, ASALG Gopala Gupta, Raghava Rao K, KRR Mohan Rao. International Journal of Engineering & Technology, 7 (2.7), 2018, pp. 820–824.

13. Enhancing Honeypot Deception Capability Through Network Service Fingerprinting. R.N. Dahbul, C. Lim, J. Purnama. Internation Conference on Computing and Applied Informatics 2019, Journal of Physics: Conf. Series 801. 2017.

14. Probabilistic Estimation of Honeypot Detection in Internet of Things Environment. O. Surnin, F. Hussain, R. Hussain, S. Ostrovskaya, A. Polovinkin, J.Y. Lee, X. Fernando. 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, 18-21 Feb. 2019, 191–196 pp.

15. Automatic Identification of Honeypot Server Using Machine Learning Techniques. Cheng Huang, Jiaxuan Han, Xing Zhang, Jiayong Liu. Hindawi, Security and Communication Networks Volume 2019, Article ID 2627608, 8 pages.

16. Survey of Attach Projection, Prediction, and Forecasting in Cyber Security. Martin Husak, Jana Komarkova, Elias Bou-Harb, Pavel Celeda. IEEE Communication Survays & Tutorials – September 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/327449459_Survey_of_Attack_Projection_Prediction_and_Forecasting_in_Cyber_Security [Access 12.05.2020]

17. Honeypots and Routers: Collecting Internet Attacks. Mohssen Mohammed, Habib-ur Rehman – CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2016. 197 p.

Надійшла / Paper received : 04.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-51-56
УДК 004.93+616-018

В.В. МОСТОВИЙ, С.Л. ГОРЯЩЕНКО
Хмельницький національний університет

СЕГМЕНТАЦІЯ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В роботі розглянуто та проаналізовано можливості застосування методів сегментації на основі ознак зв'язаності для інших типів зображень, проведений аналітичний огляд і наведена класифікація відомих методів сегментації, на підставі чого сформульовані вимоги щодо розробки структурних моделей для задач сегментації мікроскопічних медичних зображень, обґрунтована актуальність використання ознаки зв'язаності щодо задач сегментації і побудовані її математичні моделі.

Ключові слова: сегментація, математичні моделі сегментації, імітаційне моделювання.

V. V. MOSTOVYI, S.L. HORIASHCHENKO
Khmelnytskyi National University

SEGMENTATION OF MEDICAL IMAGES

Segmentation is an integral part of the digital image processing process. It is the division or division of the image into some parts that meet the specified characteristics and characterize these areas and the image as a whole. At the segmentation stage, issues are solved that complement the standard tasks of image processing, namely coding, restoration, quality improvement. The segmentation process is considered an integral part of the tasks of image recognition, classification and identification. That is why segmentation has found its wide application in such areas as microbiology, medicine, astronomy, military equipment and other areas of human life. Such research also helps psychologists and physiologists to study such processes as the perception of forms, learning and recognition of objects by living organisms and the human brain, and so on. Segmentation is widely used in the automation of microscopic examinations of various medical objects, which include the processing of images of cells of organisms and their components and hemocytological drugs. This process is an integral part of recognition and classification in medical diagnostics. Recently, work has begun on the complete automation of the process of segmentation of images of biological objects in order to increase the reliability of the diagnosis of various diseases. The information obtained as a result of segmentation is also used to identify the effects of various adverse factors and helps to predict the course of leukemia, lymphosarcoma, anemia and other diseases of the human body. The article considers and analyzes the possibility of applying segmentation methods based on signs of connectivity for other types of images, conducted an analytical review and classification of known segmentation methods, based on which the requirements for developing structural models for segmentation of microscopic medical images, substantiated the relevance of the feature connections on segmentation problems and its mathematical models are built.

Keywords: segmentation, mathematical models of segmentation, simulation modelling.

Вступ

Сегментація є складовою частиною процесу цифрової обробки зображень. Він є поділенням або ж розбиттям зображення на деякі частини, що відповідають заданим ознакам та характеризують ці області та зображення загалом. На етапі сегментації вирішуються питання, які доповнюють стандартні задачі обробки зображення, а саме кодування, реставрація, покращення якості.

Процес сегментації розглядається як невід'ємна частина задач розпізнавання, класифікації та ідентифікації зображень [4]. Саме тому сегментація знайшла своє широке застосування в таких сферах як мікробіологія, медицина, астрономія, військова техніка і решті сфер життєдіяльності людини. Також такі дослідження допомагають психологам та фізіологам у вивченні таких процесів, як сприйняття форм, навчання і розпізнавання об'єктів живими організмами та мозком людини тощо.

Сегментація широко застосовується при автоматизації мікроскопічних обстежень різноманітних медичних об'єктів, до яких можна віднести опрацювання зображень клітин організмів та їхніх складових і гемоцитологічних препаратів. Цей процес є складовою частиною розпізнавання та класифікації у медичній діагностиці.

Останнім часом розпочато роботу щодо повної автоматизації процесу сегментації зображень біологічних об'єктів задля підвищення достовірності діагностування різного роду захворювань.

Інформація, яку отримують в результаті сегментації також використовується для виявлення впливів різного роду несприятливих факторів і допомагає прогнозувати протікання лейкозів, лімфосарком, анемій та інших захворювань людського організму [9].

Автоматизація процесів сегментації медичних зображень шляхом побудови відповідної системи на основі інформаційних технологій сприяє об'єктивізації отримуваних результатів з одночасним підвищенням їх достовірності у більш стислі терміни. Остання обставина є особливо актуальною в умовах масових захворювань (епідемій та пандемій), зокрема в зв'язку із поширенням пандемії COVID-19.

У провідних країнах світу ведуться дослідження зі створення пристроїв, які допомагають автоматизувати розпізнавання і вимірювання різного роду мікроскопічних зображень у медичних препаратах. Однак, задача повної автоматизації сегментації і отримання цитоморфологічних властивостей клітин та їхніх невід'ємних частин є складною з математичної і технічної точки зору.

Першочерговим аспектом задачі сегментації є математичне обґрунтування задачі та визначення способів і методів її розв'язання. Алгоритмічна та обчислювальна сторона задачі сегментації медичних зображень полягають у втіленні даного методу в сукупність алгоритмічних процедур та особливостей для їхнього відтворення.

Проаналізувавши стан теоретичних досліджень існуючих методів, що моделюють процес сегментації і розглянувши математичні моделі, які використовуються в процесі сегментації і їх практичне застосування в галузі досліджень і діагностики мікроскопічних зображень гемоцитологічних препаратів, було зроблено висновок, що не існує достатньо ефективного універсального методу сегментації.

На теперішній час розроблено багато методів сегментації та алгоритмів для їх реалізації, але, нажаль, ті які задовольняють заданій точності і достовірності є надзвичайно складними і потребують багато часу для їх втілення. В той же час, моделі, які відрізняються простотою реалізації та своєю швидкодією, не дають потрібної точності та достовірності.

Таким чином, постає питання формулювання рекомендацій застосування тих чи інших методів сегментації зображень в конкретній практичній ситуації.

Експериментальна частина

Широкого поширення для задач сегментації медичних зображень набули моделі порогового обмеження, морфологічного градієнту та моделі нарощування областей. При порівнянні вище вказаних методів встановлено, що найбільш перспективним методом є метод нарощування областей, при цьому методі зображення представляється у вигляді сукупності структурно-зв'язаних областей, тобто враховується просторовий взаємозв'язок елементів зображення на відміну від порогової обробки. Саме це дає можливість в процесі сегментації обчислювати цитоморфометричні характеристики зображення, які можна використовувати в подальшій обробці при вирішенні задач розпізнавання, на відміну від морфологічного методу.

Основним недоліком методу нарощування областей є проблема вибору стартових точок, що заважає повній автоматизації процесу сегментації, до недоліків також можна віднести проблему вибору порогу. При цьому метод є емпіричним та не має чіткого теоретичного обґрунтування.

Задля вирішення зазначених вище проблем при таких структурних моделей зображення в роботі [2] запропоновано використовувати поняття зв'язаності.

Як зазначено в роботі [2] поняття зв'язаності доцільно застосовувати як окрему ознаку зображення, що має широку інформативність, яка порівняна тільки з яскравістю, а математичне представлення цієї ознаки, розглядається як структурно-зв'язана модель бінарного зображення з використанням понять усіченого зображення та бінарного зрізу.

Усіченим зображенням із номером k називається зображення, представлене у вигляді матриці $A^k(M,N)$, елементи якої $a^k(m,n)$ визначаються у результаті операцій віднімання дискретної величини d від елементів $a^{k-1}(m,n)$ матриці $A^{k-1}(M,N)$ зображення, причому A^0 (M,N) – матриця, що визначає вхідне зображення.

Зрізом з номером k називається сукупність бінарних елементів зображення $b^k(m,n)$, що представлена у вигляді матриці $B^k(M,N)$:

причому $b^k(m,n) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a^k(m,n) = 0 \\ 0, & \text{якщо } a^k(m,n) \neq 0 \end{cases}$

де $a^k(m, n)$ – елемент матриці усіченого зображення $A^k(M,N)$.

Зв'язаність $\delta^k(m,n)$ одиничного елемента $b^k(m,n)$ у межах даного зрізу за номером k розраховується сумою одиничних елементів, що з ним зв'язані, тобто маємо:

$$\delta^k(m,n)=b^k(m+1,n)+b^k(m-1,n)+b^k(m,n+1)+b^k(m,n-1)+b^k(m+1,n+1)+$$
$$+b^k(m-1,n-1)+b^k(m+1,n-1)+b^k(m-1,n+1),$$
$$\forall b^k(m, n) = 1.$$

Зв'язаність $\delta^{k,k+1}(m,n)$ елемента $b^k(m,n)$ з елементами сусіднього зрізу за номером k+1 (або міжзрізова зв'язаність елементу) визначається за формулою:

$$\delta^{k,k+1}(m,n)=b^{k+1}(m+1,n)+b^{k+1}(m-1,n)+b^{k+1}(m,n+1)+b^{k+1}(m,n-1)+b^{k+1}(m+1,n+1)+b^{k+1}(m-1,n-1)+b^{k+1}(m+1,n-1)+b^{k+1}(m-1,n+1), \quad \forall b^k(m, n) = 1.$$

Медичні зображення біологічних об'єктів в сучасних умовах частіше отримують у вигляді напівтонових зображень (рис. 1).

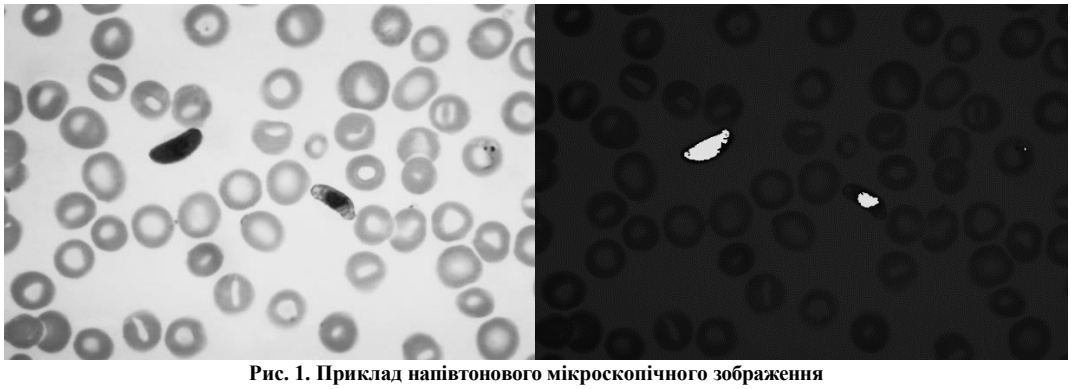


Рис. 1. Приклад напівтонового мікроскопічного зображення

Розглянемо структурну модель напівтонового зображення у вигляді сукупності бінарних зображень (зрізів), що відповідають деякому рівню яскравості:

$$A(M,N) = \cup_{k=1}^{K} B^k(M,N) \quad (1)$$

Дана модель враховує як характеристики яскравості так і просторовий зв'язок елементів зображення та може бути реалізована не складними обчислювальними операціями.

В роботі [7] запропоноване математичне представлення ознак зв'язаності як для окремих зрізів, так і для всього зображення загалом.

Внутрішньозрізова зв'язаність Δ^k (або зв'язаність зрізу за номером k) являє собою суму зв'язаностей його елементів і визначається за наступною формулою :

$$\Delta^k = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\delta^k(m,n) \quad (2)$$

Міжзрізова зв'язність $\Delta^{k,\ k=1}$ (тобто зв'язність між зрізами за номерами k і k+1) представляє суму зв'язностей елементів зрізу k з елементів зрізу k+1 визначається формулою:

$$\Delta^{k,k=1} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\delta^{k,k+1}(m,n) \quad (3)$$

Тоді можна представити:

$$\Delta(k) = \Delta^1, \Delta^2, \dots, \Delta^{k-1}, \Delta^k, \Delta^{k+1}, \dots, \Delta^k, \quad (4)$$

де $\Delta(k)$ – функція внутрізрізової зв'яності.

Функція міжзрізової зв'язаності має наступний вигляд:

$$\Delta'(k) = \Delta^{1,2}, \Delta^{2,3}, \dots, \Delta^{k-1,k}, \Delta^{k,k+1}, \Delta^{k+1,k+2}, \dots, \Delta^{K-1,K}. \quad (5)$$

Це дозволить використовувати їх для наступної обробки зображень, а також і при сегментації.

Опрацьований спосіб конструювання для перебігу сегментації та отримання структурно-зв'язносного зразка зображення, може бути використаний як метод сегментації напівтонових зображень.

Даний метод можна представити такими етапами [6]:

1) квантування зображення за рівнем яскравості згідно формули (1);
2) формування функції внутрішньозрізової зв'язаності за формулами (2, 4);
3) формулювання глобального та локального максимумів функції міжзрізової зв'язаності;
4) формулювання номеру зрізу, що відповідає значенню за п.3;
5) формування функції міжзрізової зв'язаності за формулами (3, 5);
6) знаходження значень міжзрізової зв'язаності для зрізу, знайденого в п.4 та сусіднього з ним;
7) порівняння значень, отриманих за п.6 з пороговим значенням;
8) об'єднання виділених зрізів;
9) об'єднання областей за ознаками зв'язаності.

Даний метод є інваріантним до зміни орієнтації об'єкту у площині. На відміну від вже існуючих методів він дозволяє проводити визначення ініціюючих областей сегментації не випадково, а у відповідності із зв'язносними характеристиками зображення об'єкту.

Предикат однорідності для створення перебігу сегментації за зв'язаністю, є математичною моделлю даного процесу.

$$LP(S_i^*) = \begin{cases} true, if\ \Delta'(k) \geq P_1, k_{1min} \leq k \leq k_{0max}, \\ true, if\ \Delta' \geq P_2, \quad k_0 \leq k \leq k_{2min}, \\ false, if\ other\ cases. \end{cases}$$

де $\Delta'(k)$ – функція міжзрізової зв'язності зображення; P_1P_2 – порогові значення зв'язності; k_{1min},k_{2min} – "ліве" і "праве" значення номерів зрізів, для яких міжзрізова зв'язність приймає значення P_1 і P_2 відповідно (або значення локального або глобального мінімуму) відносно номеру зрізу k_{0max}; k_{0max} – номер зрізу для якого міжзрізова зв'язність приймає значення локального або глобального максимуму.

Розробляються алгоритмічні моделі перебігу сегментації за зв'язаністю для вкрай малих гемоцитологічних зображень, що дозволяють провести імітаційне створення перебігу сегментації за зв'язаністю на прикладних зображеннях та доводять реалістичність запропонованих моделей.

Розглянуті особливості алгоритмічної реалізації методу для покращення результатів при моделюванні процесу сегментації з застосуванням проявів зв'язаності при послідовній обробці для важких зображень із великими перерізами розподілів оптичних щільностей, дають змогу ввести поняття зв'язаності між областями [11].

Припустимо, маємо виділені області $V_1(B_i,B_{i+1},\dots B_L)$ і $V_2(B_j,B_{j+1},\dots B_K)$, де $B_i,B_{i+1},\dots B_L$ – бінарні зрізи, що складають область V_1, а $B_j,B_{j+1},\dots B_K$ – бінарні зрізи, що складають область V_2. Розглянемо задачу, яка полягає у визначенні зв'язаності між зрізами областей V_1 і V_2 . Тобто зв'язаність між цими областями буде обчислюватись за формулою:

$$\Delta(V_1, V_2) = \sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{N}\Delta\left(B_i, B_j\right), \quad (6)$$

де $\Delta(B_i, B_j)$ – зв'язаність між бінарними зрізами B_i , B_j .

Приклад такого результату роботи, поєднання програмної реалізації способу моделювання сегментації та вище вказаного способу підняття підсумків сегментації надано на рис. 2, 3. Саме це дозволяє значно покращити точність сегментації.

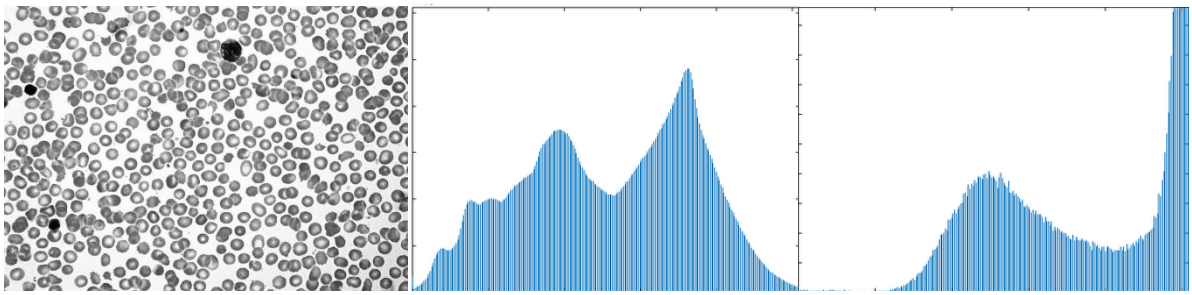


Рис. 2. Приклад вхідного зображення для сегментації: мікроскопічне зображення мазку периферичної крові та гістограми міжзрізової та внутрішньозрізової зв'язності

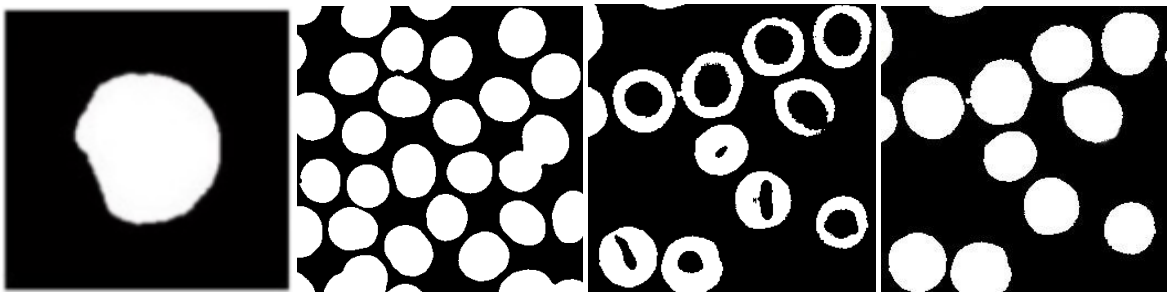


Рис. 3. Кінцевий результат сегментації: (а) – ядра лейкоциту; (б) – еритроцитів; (в) – мембрани лейкоцитів; (г) – цілого лейкоциту

Як критерій адекватності моделі процесу сегментації в роботі [10] було обрано нормовану середньоквадратичну помилку сегментації (НСКПС), вона дозволяє оцінити близькість результатів моделювання процесу сегментації деяким методом до результатів „ідеальної" сегментації. Він може бути представлений за такими формулами.

$$\text{НКПС}_i = \frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left\{b_{\lambda_i}(m,n) - \widetilde{b_{\lambda_i}}(m,n)\right\}^2}{\tilde{S}_{\lambda_i}},$$

де НКПС_i – нормована квадратична помилка сегментації i-го сегменту; $\tilde{S}_{\lambda_i}$ – площа сегменту з міткою λ_i на ідеальному зображенні, елементи - елементи матриці ідеального зображення сегменту з міткою λ, а $\tilde{b}_{\lambda_i}(m,n)$ – елементи матриці реального зображення сегменту з міткою λ_i. Саме тому необхідно усереднити НКПС за кількістю сегментів у вихідній сукупності:

$$\text{НСКПС} = \frac{\sum_{l=1}^{L}\text{НКПС}'}{L}$$

де L – кількість зображень у виборці.

Результати даного моделювання наведені в табл. 1 та на рис. 4.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень методів сегментації

№п/п	*Назва методу*	*НСКПС*
1	Метод нарощування областей в автоматичному режимі	13,8%
2	Метод нарощування областей за участю оператора	5,2%
3	Метод порогової сегментації	7,1%
4	Метод зв'язносної сегментації	6,9%
5	Метод зв'язносної сегментації + метод покращення результатів	4,1%

Отже, можна зробити підсумок, що запропонована модель є адекватною. Також було встановлено, що для гемоцитологічних зображень з нечіткими розмитими границями зв'язносний метод дає кращі результати за точністю (в середньому – на 3%) [10].

Розроблені моделі зв'язносні можуть бути представлені як на різних зображеннях одного типу, наприклад, на гемоцитологічних, так і на зображеннях інших типів. Для плямових зображень лазерних пучків сегментація зображення проводиться шляхом побудови структурної зв'язносної моделі зображення та відповідних до неї гістограм міжзрізової та внутрішньозрізової зв'язаностей. В якості ініціюючого зрізу обирався зріз з максимальною яскравістю. А поріг цього зрізу обчислювався на рівні мінімальних значень зв'язностей вліво та вправо від ініціюючого зрізу.

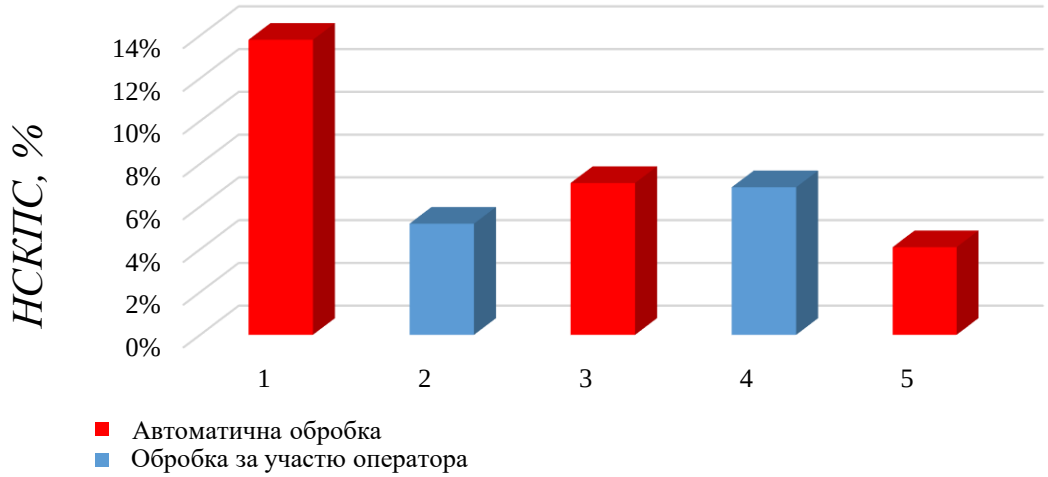


Рис. 4. Порівняльна діаграма результатів експерименту

До задачі сегментації медичних зображень, можуть бути віднесені питання текстурної сегментації зображень псоріатичного ураження шкіри. Хвороба псоріазу – це порушення, що характеризується плямами рожевого кольору, з чіткими краями, які покриті лусочками сріблясто-білого кольору. Алгоритм класифікації дерматологічних зображень на основі методу опорних векторів, який включає такі етапи [3]:

1. Завантаження RGB (Red, Green, Blue) зображення зображень псоріатичного ураження шкіри.
2. Формування вектора ознак, з використанням статистичних моментів: начального моменту 1-го порядку і центральний момент другого порядку [3].
3. Формування навчальної вибірки – кожному елементу вектора ознак ставиться у відповідність метка, яка визначає до якого кластеру відносяться образи об'єктів розпізнавання.
4. Навчання класифікатору, на основі навчальної вибірки з використанням лінійної функції ядра.
5. Завантаження зображення псоріазного захворювання.
6. Формування тестової множини для завантаженого зображення.
7. Застосування навченого класифікатору для класифікації тестової множини.
8. Обчислення точності класифікації.

Висновки

Розглянуто спосіб сегментації напівтонових зображень з одержанням зв'язносної конфігурованої моделі зображення.

Було розглянуто математичне представлення предикату сумісності для сегментації зображень на підставі властивостей зв'язаності, що створює умови для автоматизації процесу, що у поєднанні із методом знаходження точок зрізів з їх найбільшим розумінням внутрішньозрізової зв'язаності як початкових, та знаходження граничних значень як мінімальних значень функцій міжзрізової зв'язаності, що за потребою дає змогу оператору брати участь у процесі на всіх його етапах.

Досліджено алгоритм та імітаційний макет процесу сегментації за зв'язаністю на мікроскопічних гемоцитологічних зображеннях популярних методів сегментації, застосування способу опорних векторів для класифікації образів об'єктів розпізнавання в задачі сегментації медичних зображень.

Література

1. Вапник В.Н. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения) / Вапник В.Н. – М. : Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974. – 416 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка зображений / Гонсалес Р. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Кучеренко Г.О. Сегментація медичних зображень за допомогою кольорових ознак / Г.О. Кучеренко, Д.Р. Горпенко, Н.П. Волкова // Восьма Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології», ОНПУ, 23–25 травня, 2018. – С. 101–102.
4. Мартинюк Т.Б. Особливості використання позрізової обробки для сегментації багатоградаційних зображень / Т.Б. Мартинюк, Я.Г. Скорюкова, В.В. Хом'юк // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2004. – № 4. – С. 82–88.
5. Патент 55790 А України, МПК 7 G06 G7/14. Підсумовувальний пороговий пристрій / Мартинюк Т.Б., Скорюкова Я.Г., Барський С.Б., Баранов Р.К. – №2002065 ; заявл.20.06.2002 ; опубл.15.04.2003. Бюл. № 4. 2003 МПІ. – 3 с.
6. Патент № 2024939С1 РФ, МКИ G 06 K 9/00. Метод и устройство выделения изображения / Тимченко Л.И., Кутаев Ю.Ф., Марков С.М., Скорюкова Я.Г. – № 5036557 ; заявл. 08.07.91, опубл.15.12.92, Бюл. № 23. – 8 с.
7. Рыжов А. П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений / Рыжов А. П. – М. : Изд-во

МГУ, 2003.

8. Тимченко Л.И. Анализ и синтез алгоритмов распознавания объектов в масштабе реального времени / Тимченко Л.И., Скорюкова Я.Г., Марков С.М. / УкрНИИТИ. – Киев, 1991. – 46 с. – Рус. – Депонированные научные работы, 1991, № 1195. – Ук91, № 12(242), б/о 498 от 16.08.91

9. Тимченко Л.І. Метод покращення результатів сегментації гемоцитологічних зображень / Л.І. Тимченко, Я.Г. Скорюкова // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2003. – № 1-2 (5-6). – С. 46–49.

10. Тимченко Л.І. Сегментація багатоградаційних зображень на основі ознак просторової зв'язаності / Л.І. Тимченко, Я.Г. Скорюкова, С.М. Марков, Я.О. Гальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1998. – № 4. – С. 39–44.

11. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур / Р.М. Харалик // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67, № 5. – С. 98–120.

References

1. Vapnik V.N. Teoriya raspoznavaniya obrazov (statisticheskie problemy obucheniya) / Vapnik V.N. – M. : Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury izd-va «Nauka», 1974. – 416 s.

2. Gonsales R. Cifrovaya obrabotka zobrazhenij / Gonsales R. – M. : Tehnosfera, 2005. – 1072 s.

3. Kucherenko H.O. Sehmentatsiia medychnykh zobrazhen za dopomohoiu kolorovykh oznak / H.O. Kucherenko, D.R. Horpenko, N.P. Volkova // Vosma Mizhnarodna naukova konferentsiia studentiv ta molodykh vchenykh «Suchasni informatsiini tekhnolohii», ONPU, 23–25 travnia, 2018. – S. 101–102.

4. Martyniuk T.B. Osoblyvosti vykorystannia pozrizovoi obrobky dlia sehmentatsii bahatohradatsiinykh zobrazhen / T.B. Martyniuk, Ya.H. Skoriukova, V.V. Khomiuk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – 2004. – № 4. – S. 82–88.

5. Patent 55790 A Ukrainy, MPK 7 G06 G7/14. Pidsumovuvalnyi porohovyi prystrii / Martyniuk T.B., Skoriukova Ya.H., Barskyi S.B., Baranov R.K. – №2002065 ; zaiavl.20.06.2002 ; opubl.15.04.2003. Biul. № 4. 2003 MPI. – 3 s.

6. Patent № 2024939S1 RF, MKI G 06 K 9/00. Metod i ustrojstvo vydeleniya izobrazheniya / Timchenko L.I., Kutaev Yu.F., Markov S.M., Skoryukova Ya.G. – № 5036557 ; zayavl. 08.07.91, opubl.15.12.92, byul.№ 23. – 8 s.

7. Ryzhov A. P. Elementy teorii nechetkih mnozhestv i ee prilozhenij / Ryzhov A. P. – M. : Izd-vo MGU, 2003.

8. Timchenko L.I. Analiz i sintez algoritmov raspoznavaniya obektov v masshtabe realnogo vremeni / Timchenko L.I., Skoryukova Ya.G., Markov S.M. / UkrNIITI. – Kiev, 1991. – 46 s. – Rus. – Deponirovannye nauchnye raboty, 1991, № 1195. – Uk91, № 12(242), b/o 498 ot 16.08.91

9. Tymchenko L.I. Metod pokrashchennia rezultativ sehmentatsii hemotsytolohichnykh zobrazhen / L.I. Tymchenko, Ya.H. Skoriukova // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2003. – № 1-2 (5-6). – S. 46–49.

10. Tymchenko L.I. Sehmentatsiia bahatohradatsiinykh zobrazhen na osnovi oznak prostorovoi zviazanosti / L.I. Tymchenko, Ya.H. Skoriukova, S.M. Markov, Ya.O. Halchenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 1998. – № 4. – S. 39–44.

11. Haralik R.M. Statisticheskij i strukturnyj podhody k opisaniyu tekstur / R.M. Haralik // TIIER. – 1979. – T. 67, № 5. – S. 98–120.

Надійшла / Paper received : 22.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-57-64
УДК 621.317.73

І.В. ФОРКУН, Д.М. МЕДЗАТИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, О. В. ЧЕРВОНЕЦЬКИЙ
Хмельницький національний університет

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА КАЛМАНА

В статті наведено систему автоматичного керування безпілотним літальним апаратом на основі фільтра Калмана із покращеними характеристиками, що дозволяє підвищити ефективність керування та вимірювання координат безпілотних літальних апаратів. Представлені результати математичного моделювання контролерів, які використовуються в системі автоматичного керування безпілотним літальним апаратом на основі фільтра Калмана. Досліджено структурну схему системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом на основі фільтра Калмана з оптимізованою системою вимірювання, яка використовує генерації поточного стану, генерації опорних кутів і керуючі сигнали, а оцінка горизонтального та вертикального позиціонування виконується окремими програмами за заданими алгоритмами керування.

Ключові слова: система автоматичного керування, безпілотний літальний апарат, квадрокоптер, фільтр Калмана, ПІД-регулятор, ПІД-контролер, LQ-регулятор.

I. V. FORKUN, D. M. MEDZATYI, D.A. MAKARYSHKIN, O.V. CHERVONETSKII
Khmelnitsky national university

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR AN UNMANNED AIRCRAFT BASED ON A KALMAN FILTER

The article presents a system of automatic control of unmanned aerial vehicles based on Kalman filter with improved characteristics, which allows to increase the efficiency of control and measurement of coordinates of unmanned aerial vehicles. The results of mathematical modeling of controllers used in the system of automatic control of unmanned aerial vehicles based on the Kalman filter are presented. The structural scheme of the unmanned aerial vehicle automatic control system based on the Kalman filter with an optimized measurement system that uses current state generation, reference angle generation and control signals is studied, and the assessment of horizontal and vertical positioning is performed by separate programs according to specified control algorithms. A comparative analysis of the PID controller and LQ controller during the test flight, taking into account the actual and specified altitude.

Key words: *automatic control system, unmanned aerial vehicle, quadcopter, Kalman filter, PID controller, PID controller, LQ controller.*

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів є надзвичайно важливим для обороноздатності, суверенітету та економіки України. Спектр практичного застосування безпілотних літальних апаратів є дуже широким. Найбільш важливі задачі безпілотних літальних апаратів пов'язані із їх застосуванням у військовій, цивільній (державні, приватні, комерційні) та антитерористичній галузі.[1]. Безпілотні літальні апарати мають ряд переваг: висока маневреність, широко використовуються в усіх сферах людської діяльності, надійність та економічність. Безпілотні літальні апарати застосовуються у широкому спектрі додатків, таких як наукові дослідження, громадянське будівництво, воєнне використання, аерофотозйомка, пошуково-рятувальні операції, та огляди зони ризиків [2–5]. Одним з важливіших класів безпілотних літальних апаратів є квадрокоптери, які мають значні переваги по багатьох параметрах, таких як, простота конструкції, швидке їх виготовлення та мала ціна [6,7]. В останні роки предметом багатьох наукових досліджень в області квадрокоптерів було керування їх положенням, у частковому випадку висоти квадрокоптера [6]. Під час проведення цих наукових досліджень було запропоновано багато алгоритмів для вирішення проблеми керування квадрокоптером.

При проведені наукових досліджень у напрямку застосувань квадрокоптерів у різних сферах людської діяльності, акцент робиться на наступні задачі: автономна посадка на рухомі платформи [6], точна посадка для автономної стикувальної та бездротової системи самозарядки [6] та завдання автономної доставки [6]. Ці всі задачі можуть бути вирішені за рахунок використання надійного та ефективного контролера для регулювання висоти. Тому проектування системи автоматичного регулювання висоти квадрокоптера з покращеними параметрами та характеристиками є актуальною задачею над якою сьогодні працюють усі наукові дослідники в цій області. З цією метою у науковій роботі [6,7] було розглянуто проблему контролю висоти, де запропоновано алгоритм для виконання задач відстеження траєкторії квадрокоптера, який базується на керуванні висотою за допомогою адаптивного динамічного контролера для усунення проблеми з невизначеностями параметрів моделі. У роботах [8] та [9] застосовують розсувний режим контролю для керування горизонтальним положенням, що дає можливість забезпечувати вдосконалення контролю висоти, а також цей метод використовується для покращення характеристик контролю висоти квадрокоптера.

У роботі [10], для керування динамікою висоти безпілотного літального апарату було запропоновано нейромережевий підхід. Наукові результати, які були отримані цим методом, були співставленні зі звичайним ПІД-регулятором, де було встановлено, що недоліком такого методу є скорочений термін служби всієї системи керування в цілому. Незважаючи на те, що у сучасній наукових дослідженнях запропоновано багато різних методів керування безпілотного літального апарату, найбільш

поширеним метод є ПІД-регулятор, який має ряд наступних переваг: простота, легке його проєктування та забезпечення необхідної продуктивності системи автоматичного керування. В останніх дослідженнях [6] пропонується використовувати багатоконтурну архітектуру керування квадрокоптерами, тобто архітектуру з внутрішнім та зовнішнім циклом. Контролери керування такої архітектури зовнішнього контуру були розроблені різними способами, тоді як контролери внутрішнього контуру реалізуються на базі ПІД-закону.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Звичайний ПІД-контролер має кілька обмежень: нестабільність ПІД-контролера при великому діапазоні роботи, який носить нелінійний характер у системі автоматичного керування; звичайні ПІД-контролери базуються на лінійній моделі. Для подолання цих недоліків у роботі [11] було представлено ПІД-контролер, який визначає підсилення шляхом лінійного ПІД-регулювання коефіцієнта підсилення як функції відстеження похибок, а у науковій роботі [12], автори використовували таблицю підбору для планування виграшів ПІД-контролера у завданні керування.

Ці методи дали змогу підвищити ефективність керування, тільки в різних робочих умовах. Однак, це все ще лінійний закон керування, тому ПІД-контролер нестабільно функціонує в нелінійних системах. Крім того, планування виграшів призводить до неперервних переходів, а це в свою чергу призводить до раптових ривків або коливань. Квадрокоптер, який здатен до самоналаштування представляє собою нечіткий ПІД-контролер, де підсилення налаштовується нелінійно за допомогою нечіткої логіки. Такий нелінійний ПІД-контроль здатен досягнути асимптотичну стабільність системи за наявності невизначеностей. Інший спосіб подолати труднощі в керуванні нелінійною системою - представити динамічну системою за нечіткою моделлю Такагі – Сугено [13].

Аналіз існуючих методів по розробці систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами є складними для проєктування та потребують великих обчислювальних ресурсів. Тим часом закон ПІД-регелювання, є простим та ефективного методом керування для різноманітних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами.

Модель переміщення квадрокоптера (1) lпредставлена у вигляді його конфігурації на рисунку 1 [6], у якій ϕ, θ і ψ позначають три кути Ейлера, де $\phi < \pi/2$, $\theta < \pi/2$, а $\psi \le \pi$. Координати x, y та z відповідно представляють положення квадрокоптера вздовж осей x, y та z у фіксованій наземній навігації {E}. j_x, j_y, та j_z - це моменти інерції вздовж осей *x*, *y* та *z* відповідно; m-масу, *l* - довжина плеча пристрою і *g* гравітаційне прискорення [6].

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \left(\dfrac{j_x - j_z}{j_x}\right)\theta\psi + \dfrac{l}{j_x}U_2 \\ \ddot{\theta} = \left(\dfrac{j_z - j_x}{j_y}\right)\phi\psi + \dfrac{l}{j_y}U_3 \\ \ddot{\psi} = \left(\dfrac{j_x - j_y}{j_z}\right)\theta\phi + \dfrac{1}{j_z}U_4 \\ \ddot{x} = \dfrac{1}{m}\left(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi\right)U_1 \\ \ddot{y} = \dfrac{1}{m}\left(\cos\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\phi\cos\psi\right)U_1 \\ \ddot{z} = g - \dfrac{1}{m}(\cos\phi\cos\theta)U_1 \end{cases} \quad (1)$$

де U_1, U_2, U_3, U_4 – входи керування, які визначаються наступним чином:

$$\begin{cases} U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ U2 = F_4 - F_2 \\ U_3 = F_3 - F_1 \\ U_4 = C_d\,(F_1 + F_3 - F_3 - F_4) \end{cases} \quad (2)$$

де $Fi = C_t\Omega_i^2$ - сила тяги, яка створюється двигуном *i*; Ωi - швидкість двигуна *i*; C*t* та C*d* - коефіцієнти тяги та опору відповідно.

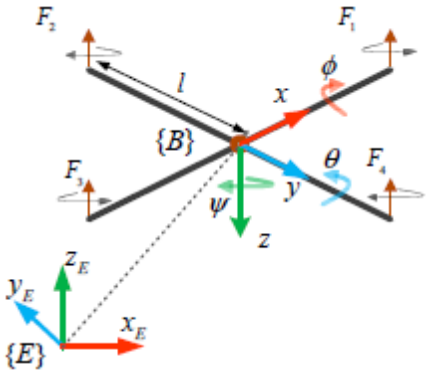


Рис. 1. Конфігурація квадрокоптера

Загальна структурна схема автоматичного керування складається з контролерів положення і висоти (рисунок 2). Звичайні PID-регулятори використовуються для горизонтального (x і y) контролю положення і висоти, а алгоритм для керування висотою, який в свою чергу може використовуватися для горизонтального керування становищем [6].

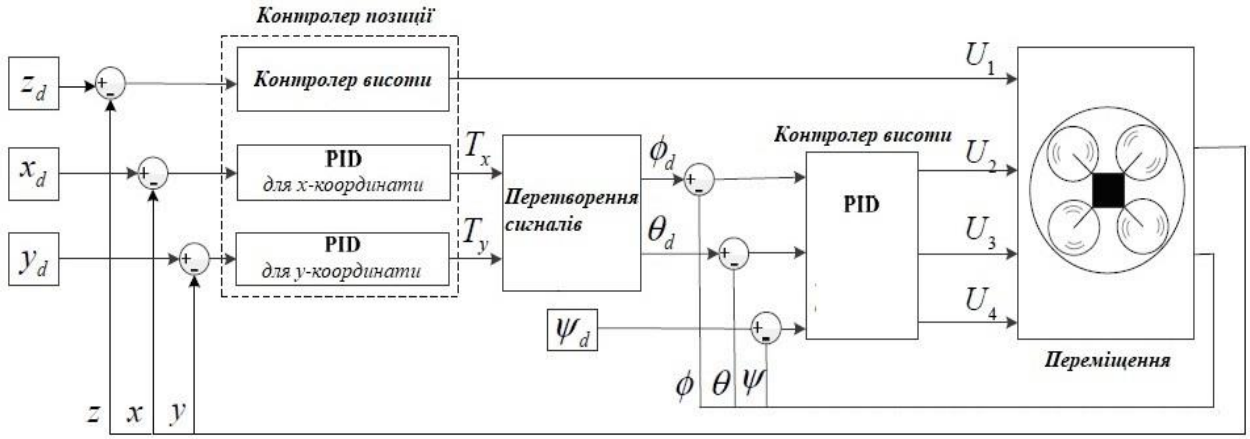


Рис. 2. Повна структурна схема автоматичного керування квадрокоптера: алгоритм роботи застосовуються для контролю висоти в той час як ПІД- регулятори використовуються для контролю горизонтального положення і висоти

Виклад основного матеріалу дослідження

Контроль стану квадрокоптера розділено на дві частини - горизонтальну і вертикальну. Для керування вертикальним станом у роботі пропонується використовувати підхід, який представлено в [14], а саме застосовувати *PID* регулятор і *LQ* регулятор, а для горизонтального переміщення необхідно використовувати контролер позиції, який підтримує постійне положення і контролер траєкторії, що підтримує постійну швидкість. Контролери, які відповідають за вертикальний стан генерують сигнал, що керує тягою, а контролери, які відповідають горизонтальному стану, в свою чергу генерують відповідні кути, які використовуються контролером кутів. Загальна структурна схема системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом представлена на рисунку 3, особливістю якої є використання фільтра Калмана. Методи фільтра Калмана розповсюджуються дуже легко на задачі визначення недоступних безпосередньому вимірюванню координат об'єкта, що в свою чергу, дає можливість отримати їх оптимальні оцінки в умовах дії завад та перешкод.

Для підтримки заданої висоти були реалізовані два різних регулятора: *LQ* регулятор і *PID* регулятор. Обидва регулятора використовують два компоненти із прямою передачею: статичної тяги і кута квадрокоптера. Пряма передача статичної тяги означає, що регулятори не повинні компенсувати гравітаційне прискорення, а лише керувати відхиленнями від заданої висоти. Щоб залишатися в повітрі при збільшенні куту нахилу або кроку, необхідно використовувати більше тяги. Пряма передача цього кута означає, що регулятори не повинні компенсувати ці зміни. Сигнал, що генерується контролерами, $u_{controller}$ додається до сигналу, який відповідає за прискорення u_0. Потім генерується сигнал керування акселератором, $u_{throttle}$ шляхом компенсації поточних кутів нахилу і кроку відповідно до виразу (3):

$$u_{throttle} = \frac{u_0 + u_{controller}}{z_g + z_Q} \tag{3}$$

де z_g та z_Q описані у роботі [14].

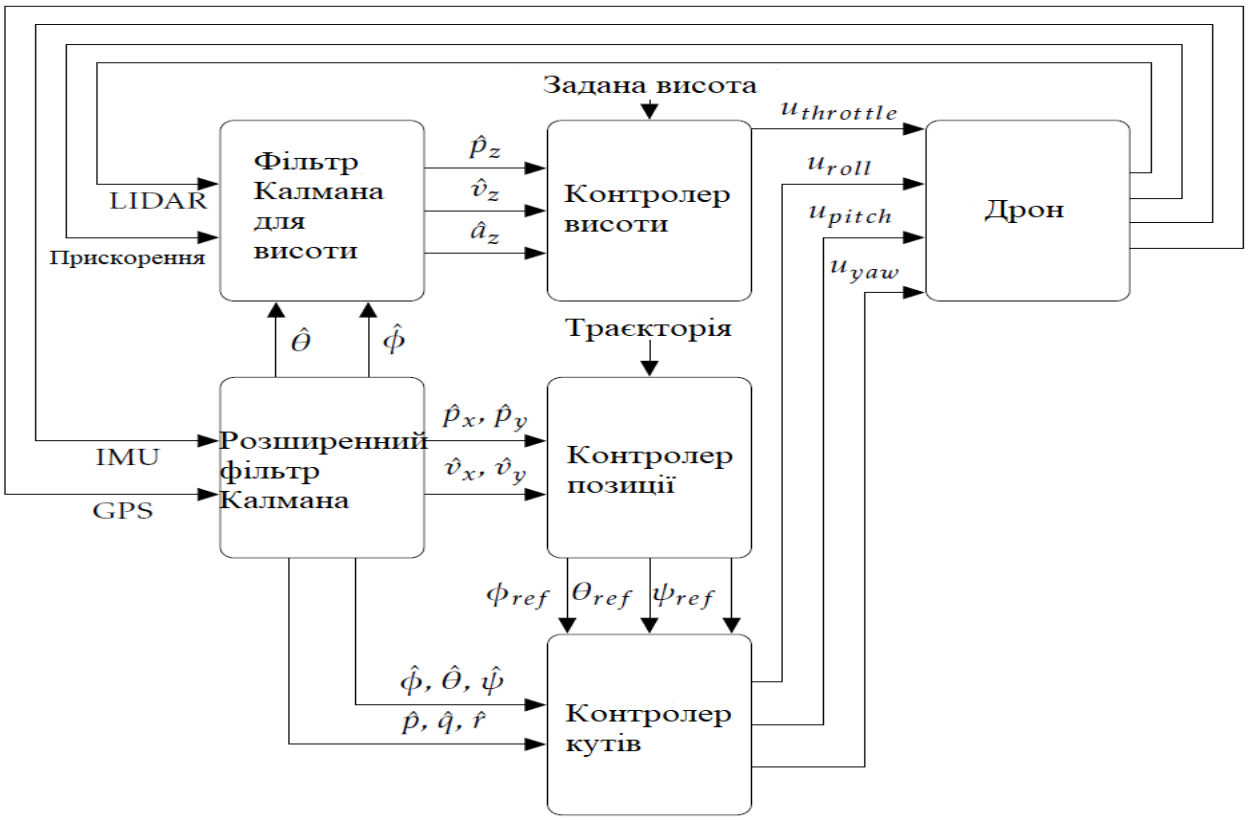


Рис. 3. Загальна структурна схема системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом на основі фільтра Калмана

Для того, щоб отримати оцінку вертикальної швидкості v, згладжену оцінку висоти h та оцінку тяги, яка є необхідною для наведення u_0, фільтр Кальмана був реалізованай з використанням вимірювань на акселерометрах і лідарі. Модель такого фільтра Калмана представлена у роботі [14].

Використовуючи висоту та вертикальну швидкість, які оцінені фільтром Калмана, які наведені у роботі [14], був реалізований PID-регулятор висоти відповідно до

$$e = h_{ref} - h, \tag{4}$$

$$u_{PID} = K_p e + K_I \int_0^t (e)dt - K_D \vartheta \tag{5}$$

Для запобігання перевантаження системи, використовується умовна інтеграція, де умовою об'єднання є те, що , $u_{throttle}$ повинен знаходитися в інтервалі , u_0 ±0.25. Цей інтервал був обраний, оскільки , u_0 =0.75. , а $u_{throttle}$ знаходиться в межах [0; 1], а інтервал, де дозволено об'єднання, повинен бути приблизно симетричним до u_0, щоб однаково обробляти додатні та від'ємні відхилення висоти. Для того, щоб визначити стабільність системи, співвідношення між $u_{throttle}$ і висотою h було визначено. Наступні обчислення зроблені в припущенні, що значення ϕ і θ є маленькими, і що кут прямої передачі буде обробляти кутові відхилення. Якщо припустити, що тяга від двигунів є лінійною функцією сигналу керування, сила тяги дорівнює $F_{throttle}=F_t u_{throttle}$, для деякого параметра K_t. При наведенні пари $u_{throttle} = u_0$ і $F_{throttle}=mg$. Отже,

$$K_t u_0 = mg \Rightarrow K_t = \frac{mg}{u_0} \; K_t u_0 = mg \;\Rightarrow\; K_t = \frac{mg}{u_0} \tag{6}$$

використовуючи (3) та $F=ma$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{K_t u_{throttle} - mg}{m} = \frac{K_t u_0 + K_t u_{PID} - mg}{m} = \frac{K_t u_{PID}}{m} = \frac{u_{PID} g}{u_0} \; K_t u_0 = mg \;\Rightarrow\; K_t = \frac{mg}{u_0} \tag{7}$$

Використовуючи u_{PID}, описану у виразі (5), диференціальне рівняння можна записати наступним чином

$$a = \ddot{h} = \frac{g}{u_0}(K_p(h_{ref} - h) + \int_0^t (h_{ref} - h)dt - K_D\dot{h}) \Rightarrow \frac{u_0}{g}\ddot{h} + K_p h + K_I \int_0^t h dt +$$

$$+ K_D\dot{h} = K_p h_{ref} + K_I \int_0^t h_{ref}\, dt \qquad (8)$$

Співвідношення (8), можна представити у наступному вигляді (9):

$$\left(\frac{u_0}{g}s^3 + K_D s^2 + K_p s + K_I\right)h = \left(K_p s + K_I\right)h_{ref} \Rightarrow h = \frac{K_p s + K_I}{\frac{u_0}{g}s^3 + K_D s^2 + K_p s + K_I}. \qquad (9)$$

Параметр u_0 не має постійного значення, але зазвичай знаходиться в інтервалі 0,7-0,8. Функція вибору напрямку в (9) можна використовувати для визначення полюсів системах замкненого циклу, а також для моделювання покрокових відповідей для різних значень u_0. Були проведені випробовування з різними параметрами, і змодельована покрокова відповідь зі значеннями K_p=0.2, K_I=0.05 та K_D=0.2. Покрокові відповіді для різних значень u_0 можна побачити на рисунку 5, а діаграма Боде представлена на рисунку 4.

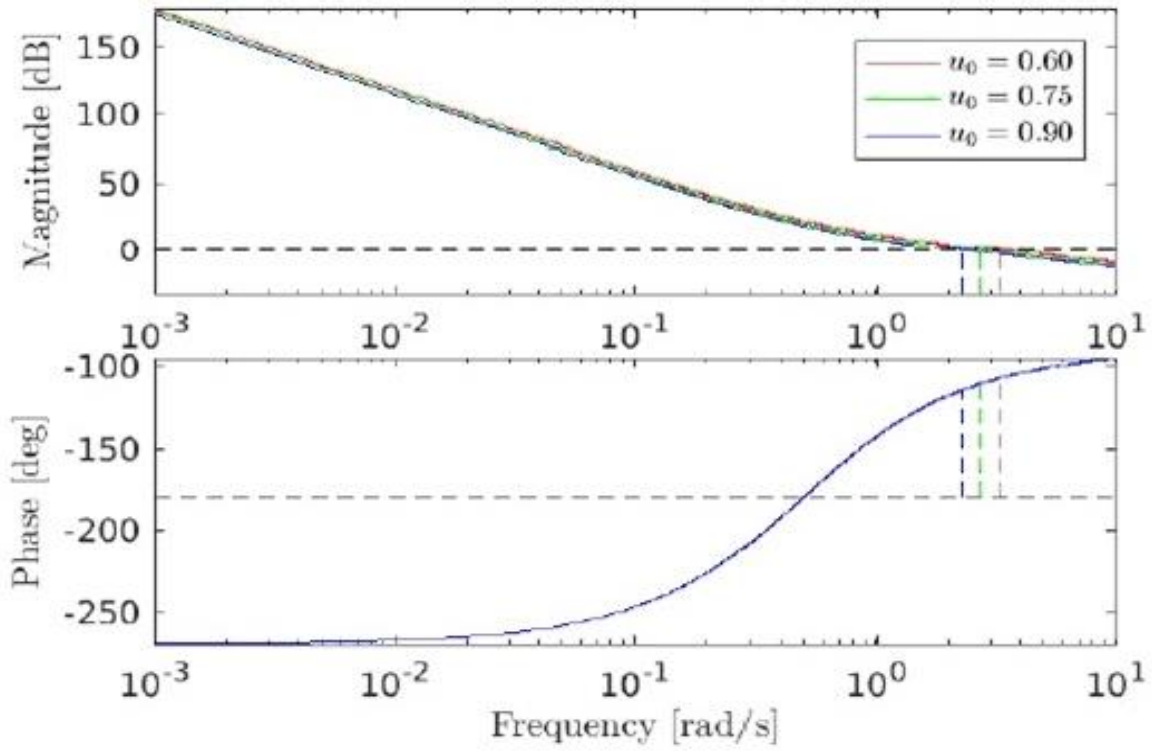


Рис. 4. Діаграма Боде PID-контролера для різних значень u_0

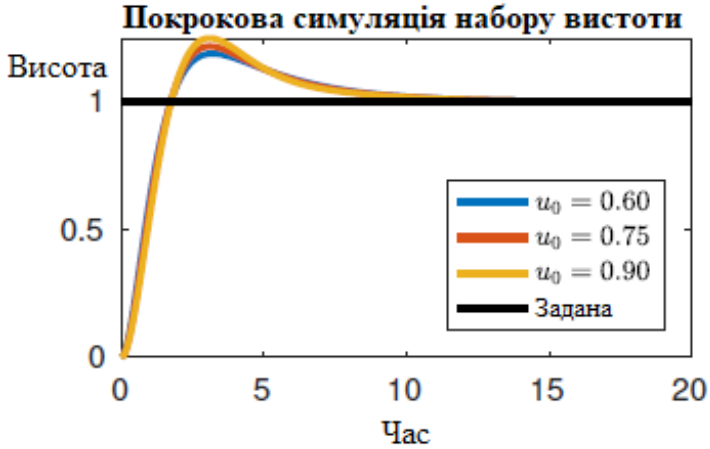


Рис. 5. Результат моделювання покрокової відповіді після переміщення в задану висоту з використанням PID-контролера для різних значень u_0

Результати випробувального польоту з використанням цих параметрів можна побачити на рис. 6.

Рис. 6. Виміряна висота при дотриманні якої використовують PID-регулятор

Для того, щоб створити LQ-регулятор висоти, необхідна модель станів простору. У цій моделі нехтують силою тертя, а вхідним сигналом є сила, а не керуючий сигнал. Причиною цього є те, що оскільки u_0 не є постійним, зв'язок між станами та керуючим сигналом не є лінійним. Проте, співвідношення між станами і утвореною силою є лінійним. Така модель представлена у роботі [14].

Результати, які були отримані при покроковій відповіді представлені на рисунку 7, а Діаграма Боде на рисунку 8.

Рис. 7.Результат моделювання покрокової відповіді після кроку на заданій висоті за допомогою LQ регулятора

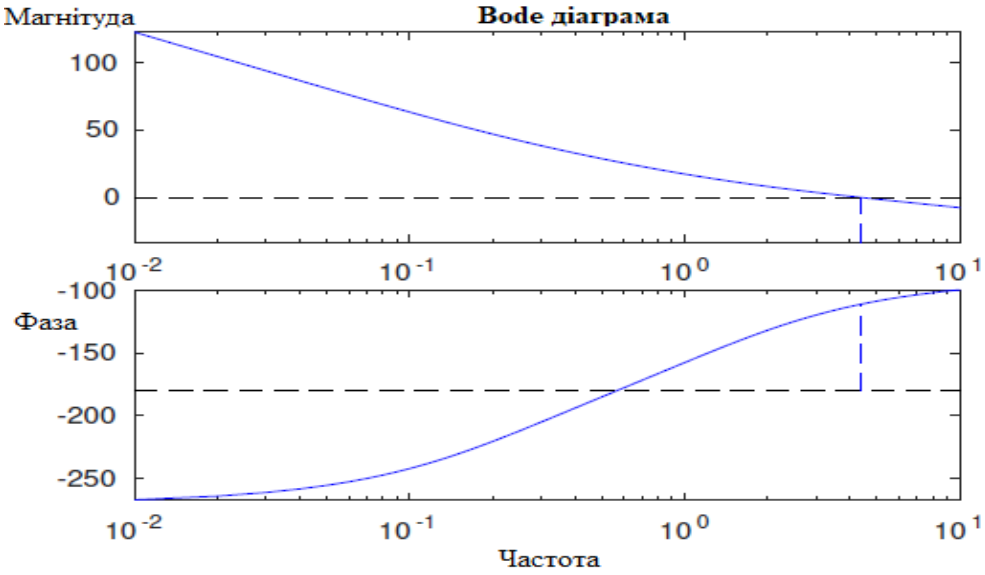


Рис. 8. Діаграма Боде для LQ регулятора

Рис. 9 Виміряна висота при дотриманні заданої висоти за допомогою LQ регулятора

Проводячі аналіз покрокових відповідей LQ та PID регуляторами, можна зробити висновок, що LQ-регулятор є швидшим і має меншу похибку відхилення. Однак, незважаючи на те, що цей регулятор має більший час встановлення, на нього не впливають зміни в u_0. Залежно від u_0, PID-регулятор має вищу або нижчу різницю по фазі, ніж LQ-регулятор. Реальну та задану висоту під час випробувального польоту представлено на рисунку 9. У порівнянні з PID регулятором, LQ має менше відхилення при зльоті, а після зльоту, показує кращу швидкість.

Висновки

Встановлено, що при використанні системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом на основі фільтра Калмана, збільшуючи сигнал двигуна, який відповідає за прискорення безпілотного літального апарату, фаза є постійною, а магнітуда спадає, при цьому зменшуючи різницю фази. Розмір різниці по фазі дозволяє компенсувати відхилення для тимчасових затримок.

PID-регулятор з великою ефективністю утримує задану висоту, однак його недоліком є значне перевищення висоти при зльоті. Це обумовлено ефектом впливу землі, який спричиняє несподівано потужний підйом до того, як безпілотний літальний апарат покине стартову площадку.

Визначено, що для LQ-регулятора в системі автоматичного керування безпілотним літальним апаратом запас по фазі складає 68.99 градусів, а перехресні частоти дорівнюють 4,34 рад/с, які виступають в противагу часовим затримкам, що в свою чергу, залишаються постійними в залежності від сигналу двигуна.

Контролер висоти в системі автоматичного керування безпілотним літальним апаратом на основі фільтра Калмана, підтримує відповідну висоту поточної точки маршруту, в той час як контролер траєкторії слідує по лінії руху в горизонтальній проекції.

Література

1. Луцький М.Г. Розвиток міжнародного регулювання та нормативної бази використання безпілотних літальних апаратів / М.Г. Луцький, В.П. Харченко, Д.О. Бугайко // Вісник НАУ. – 2015. – № 4. – С. 5-14. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / Дьяконов В.П.– Издательство: Л.: Энергия, 2009. – 384 с.

2. Xuan-Mung N. A Multicopter ground testbed for the evaluation of attitude and position controller / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Int. J. Eng. Technol. - 2018,. - №7. - p. 65–73.

3. Yu Y. A Quadrotor test bench for six degree of freedom flight / Yu, Y., Ding, X. // J. Intell. Robot. Syst. – 2012. - № 68. – p. 323–338.

4. Lee K.U. Inverse optimal design for position control of a quadrotor / Lee K.U., Choi Y.H., Park J.B.// Appl. Sci. – 2017. – p. 907.

5. Nguyen N.P. Sliding mode thau observer for actuator fault diagnosis of quadcopter UAVs / Nguyen N.P., Hong S.K. // Appl. Sci. - 2018 – p. 1893.

6. Xuan-Mung N. Improved Altitude Control Algorithm for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicles / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Applied sciences - 2019,. - №9., 2122 - p.1–15.

7. Santos M.C.P. An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks / Santos M.C.P., Rosales C.D., Sarapura J.A., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. // J. Intell. Robot. Syst. – 2019. – p.5–16.

8. Jayakrishnan H.J. Position and attitude control of a quadrotor UAV using super twisting sliding mode / Jayakrishnan H.J. // IFAC Pap. Online – 2016. - p. 284–289.

9. Xiong J.J. Position and attitude tracking control for a quadrotorUAV / Xiong J.J., Zheng E.H. // ISA Trans. 2014.

10. Muliadi J. Neural network control system of UAV altitude dynamics and its comparison with the PID control system / Muliadi J., Kusumoputro B. // J. Adv. Trans. 2018. – p.1–18.

11. Nguyen N.P. Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling / Nguyen

N.P., Hong S.K. // Int. J. Eng. Res. Technol. - 2018, №11. –p.1485–1498.

12. Milhim A.B., Zhang Y. Gain Scheduling based PID controller for fault tolerant control of a quad-rotor UAV / Milhim A.B., Zhang Y. // In Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace, Atlanta, GA, USA, 20–22 April 2010.

13. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / Takagi T., Sugeno M. // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1985. - №1. - p.116–132.

14. Gustafsson F. Statistical Sensor Fusion. Studentlitteratur AB / Gustafsson F. // second edition. - 2012. – p. 2-29.

References

1. Luckij M.G. Rozvitok mizhnarodnogo regulyuvannya ta normativnoyi bazi vikoristannya bezpilotnih litalnih aparativ / M.G. Luckij, V.P. Harchenko, D.O. Bugajko // Visnik NAU. – 2015. – № 4. – S. 5-14. Dyakonov V.P. Generaciya i generatory signalov / Dyakonov V.P.– Izdatelstvo: L.: Energiya, 2009. – 384

2. Xuan-Mung N. A Multicopter ground testbed for the evaluation of attitude and position controller / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Int. J. Eng. Technol. - 2018,. - №7. - p. 65–73.

3. Yu Y. A Quadrotor test bench for six degree of freedom flight / Yu, Y., Ding, X. // J. Intell. Robot. Syst. – 2012. - № 68. – p. 323–338.

4. Lee K.U. Inverse optimal design for position control of a quadrotor / Lee K.U., Choi Y.H., Park J.B.// Appl. Sci. – 2017. – p. 907.

5. Nguyen N.P. Sliding mode thau observer for actuator fault diagnosis of quadcopter UAVs / Nguyen N.P., Hong S.K. // Appl. Sci. - 2018 – p. 1893.

6. Xuan-Mung N. Improved Altitude Control Algorithm for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicles / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Applied sciences - 2019,. - №9., 2122 - p.1–15.

7. Santos M.C.P. An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks / Santos M.C.P., Rosales C.D., Sarapura J.A., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. // J. Intell. Robot. Syst. – 2019. – p.5–16.

8. Jayakrishnan H.J. Position and attitude control of a quadrotor UAV using super twisting sliding mode / Jayakrishnan H.J. // IFAC Pap. Online – 2016. - p. 284–289.

9. Xiong J.J. Position and attitude tracking control for a quadrotorUAV / Xiong J.J., Zheng E.H. // ISA Trans. 2014.

10. Muliadi J. Neural network control system of UAV altitude dynamics and its comparison with the PID control system / Muliadi J., Kusumoputro B. // J. Adv. Trans. 2018. – p.1–18.

11. 11. Nguyen N.P. Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling / Nguyen N.P., Hong S.K. // Int. J. Eng. Res. Technol. - 2018, №11. –p.1485–1498.

12. Milhim A.B., Zhang Y. Gain Scheduling based PID controller for fault tolerant control of a quad-rotor UAV / Milhim A.B., Zhang Y. // In Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace, Atlanta, GA, USA, 20–22 April 2010.

13. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / Takagi T., Sugeno M. // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1985. - №1. - p.116–132.

14. Gustafsson F. Statistical Sensor Fusion. Studentlitteratur AB / Gustafsson F. // second edition. - 2012. – p. 2-29.

Надійшла / Paper received : 23.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-65-71
УДК 004.031.6 : 621.3.07

С.Г. НАТРОШВІЛІ, Г.Р. НАТРОШВІЛІ, Т.Г. БАБІНА, Б.М. ЗЛОТЕНКО, Т.І. КУЛІК
Київський національний університет технологій та дизайну

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИРОДНИМ І ШТУЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

Стаття присвячена дослідженню системи керування освітленням «розумного будинку». Метою роботи є розроблення та експериментальне дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування освітленням «розумного будинку» на базі мікроконтролера Arduino Leonardo для автоматичного позиціонування пластин жалюзі і вмикання та вимикання освітлювальних приладів. Дослідження проведено на основі використання спеціально розробленої експериментальної установки, яка включає в себе контролер Arduino Leonardo, механізм приводу жалюзі, а також світлодіоди для імітації природного і штучного освітлення і датчики освітленості. В якості датчика освітленості використано фоторезистор. В результаті проведеного експериментального дослідження підтверджено працездатність розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи освітлення розумного будинку. Отримана експериментальна залежність падіння напруги на фоторезисторі від яскравості внутрішнього світлодіода підтверджує достовірність прийнятих вихідних положень в процесі створення системи освітлення і її програмного забезпечення. Запропонована система дозволяє використовувати природне освітлення за рахунок автоматичного відкриття жалюзі у світлий період доби, закриття жалюзі і увімкнення освітлювальних приладів протягом темного періоду. Наведено алгоритм роботи системи освітлення, створено керуючу програму на мові програмування Wiring для завантаження в контролер Arduino Leonardo, використовуючи персональний комп'ютер з USB інтерфейсом. Оптимальне використання природного освітлення квартири, будинку або офісу необхідно для здоров'я людей, їх комфорту, а також економії енергоресурсів. Тому розроблена система освітлення «розумний будинок» забезпечує регулювання інтенсивності природного світлового потоку за рахунок автоматичного управління положенням заслінок жалюзі. При настанні темного періоду доби автоматичне закриття віконного пройму за допомогою жалюзі і вмикання штучного освітлення забезпечує необхідний рівень комфорту мешканцям розумного будинку.

Ключові слова: *освітлення, контролер, система керування, Arduino Leonardo, жалюзі.*

S.G. NATROSHVILI, G.R. NATROSHVILI, T.G. BABINA, B.M. ZLOTENKO, T.I. KULIK
Kyiv National University of Technologies and Design

COMPUTER-INTEGRATED CONTROL SYSTEM FOR NATURAL AND ARTIFICIAL LIGHTING OF A SMART BUILDING

The article is devoted to the study of a smart home's lighting control system. The aim of the work is the development and experimentally study of a computer-integrated lighting control system for a smart home based on the Arduino Leonardo microcontroller for automatic positioning of blind panels and switching on and off lighting fixtures.The study was conducted using a specially designed experimental setup that includes an Arduino Leonardo controller, a blinds drive mechanism, as well as LEDs for simulating natural and artificial lighting and light sensors. A photoresistor is used as a light sensor. The Monitor program is used to display the data coming from the Arduino controller to the personal computer via the USB serial interface. The data that is read is displayed on the monitor screen by transmitting it via the serial port. At the same time there is an automatic return of the carriage and transition to a new line. As a result of the experimental study, the performance of the developed computer-integrated lighting system for the smart home was confirmed. The obtained experimental dependence of the voltage drop across the photoresistor on the brightness of the internal LED confirms the reliability of the adopted initial positions in the process of creating the lighting system and its software. The proposed system allows the use of natural light by automatically opening the blinds during the daytime, closing the blinds and turning on the lighting fixtures during the dark period. An algorithm for the operation of the lighting system is presented; a control program in the Wiring programming language has been created for loading into an Arduino Leonardo controller using a personal computer with a USB interface. Optimal use of natural light in an apartment, house or office is necessary for people's health, their comfort, as well as energy savings. In this regard, the developed lighting system "smart home" provides regulation of the intensity of natural lighting due to automatic control of the position of the blinds. At nightfall, automatic closing of the windows with blinds and switching on artificial lighting provides the necessary level of comfort for the residents of the smart home.

Keywords*: lighting, controller, control system, Arduino Leonardo, blinds.*

Вступ

В сучасному світі, у зв'язку з наростаючою комп'ютеризацією усіх сфер життєдіяльності людини, технології комп'ютерно-інтегрованого керування знайшли своє широке застосування в багатьох галузях науки, техніки і промисловості. Серед багатьох прикладів можна навести таке поняття як «розумний будинок». Система «розумний будинок» представлена комп'ютерно-інтегрованими комплексами, які здійснюють керування усім інженерним оснащенням будівель, у тому числі, електроприладами, освітленням і температурою повітря в приміщеннях [1–3].

Оптимальне використання природного освітлення квартири, будинку або офісу необхідно для здоров'я людей, їх комфорту, а також економії енергоресурсів. Тому проектування системи «розумний будинок» передбачає розробку систем регулювання інтенсивності природного світлового потоку за рахунок автоматичного управління положенням заслінок жалюзі. При настанні темного періоду доби автоматичне закриття віконного пройму за допомогою жалюзі і вмикання штучного освітлення забезпечить необхідний рівень комфорту мешканцям розумного будинку [4, 5].

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування освітленням «розумного будинку» для автоматичного позиціонування пластин жалюзі і вмикання та вимикання освітлювальних приладів.

Для проведення дослідження потрібно обрати компоненти і реалізувати експериментальну установку, яка має у своєму складі усі елементи системи освітлення і дозволяє імітувати зміну світлого і темного періодів доби.

Результати дослідження

Одним із головних компонентів системи є мікроконтролер, який забезпечує програмне керування виконавчими елементами, такими як електропривод механізму жалюзі і електромагнітне реле для комутації електричного кола освітлювальних приладів.

В системах «розумний будинок» широко використовуються контролери Arduino, які стали одними з найпопулярніших контролерів на ринку з величезною різноманітністю плат [6, 7]. Для реалізації системи освітлення був обраний контролер Arduino Leonardo – пристрій на базі мікроконтролера ATmega32U4. До складу пристрою входить 20 входів/виходів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм micro-USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішньосхемного програмування і кнопка скидання. Об'єм вільної пам'яті для зберігання програми в мікроконтролері ATmega32U4 дорівнює 32 кБ, 4 кБ виділяється під потреби завантажувача. Об'єм оперативної пам'яті типу SRAM дорівнює 2,5 кБ. В мікроконтролер ATmega32U4 вбудований USB-контролер, що виключає необхідність в додатковому процесорі [8, 9].

Принципова електрична схема системи освітлення для дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи освітлення на основі використання Arduino Leonardo наведена на рис. 1.

При подачі живлення до виводу VUSB контролера ATmega 32U4 здійснюється вмикання внутрішнього світлодіода HL1, який імітує денне світло, і встановлення початкового положення 0, яке займає вал виконавчого двигуна M1. В цьому положенні жалюзі відкриті. При цьому забезпечується попадання світлового потоку, випромінюваного світлодіодом HL1, на чутливий елемент фоторезистора LDR1.

Фоторезистор і один із аналогових виводів AI0 аналого-цифрового перетворювача контролера призначені для зчитування аналогових значень в межах 0-1023, що відповідає зміні напруги в межах 0-5 В, і порівняння зі значенням, що задане за допомогою програми.

Оскільки світловий потік потрапляє на фоторезистор, це значення стає меншим заданої величини, в результаті чого перевіряється положення вала виконавчого двигуна M1 і визначається виконання умови відповідності цього положення величині 120º. При цьому із привода виконавчого серводвигуна M1 на вивід контролера DP9 потрапляє вихідна напруга потенціометра серводвигуна, після чого відбувається її порівняння з величиною, заданою програмою.

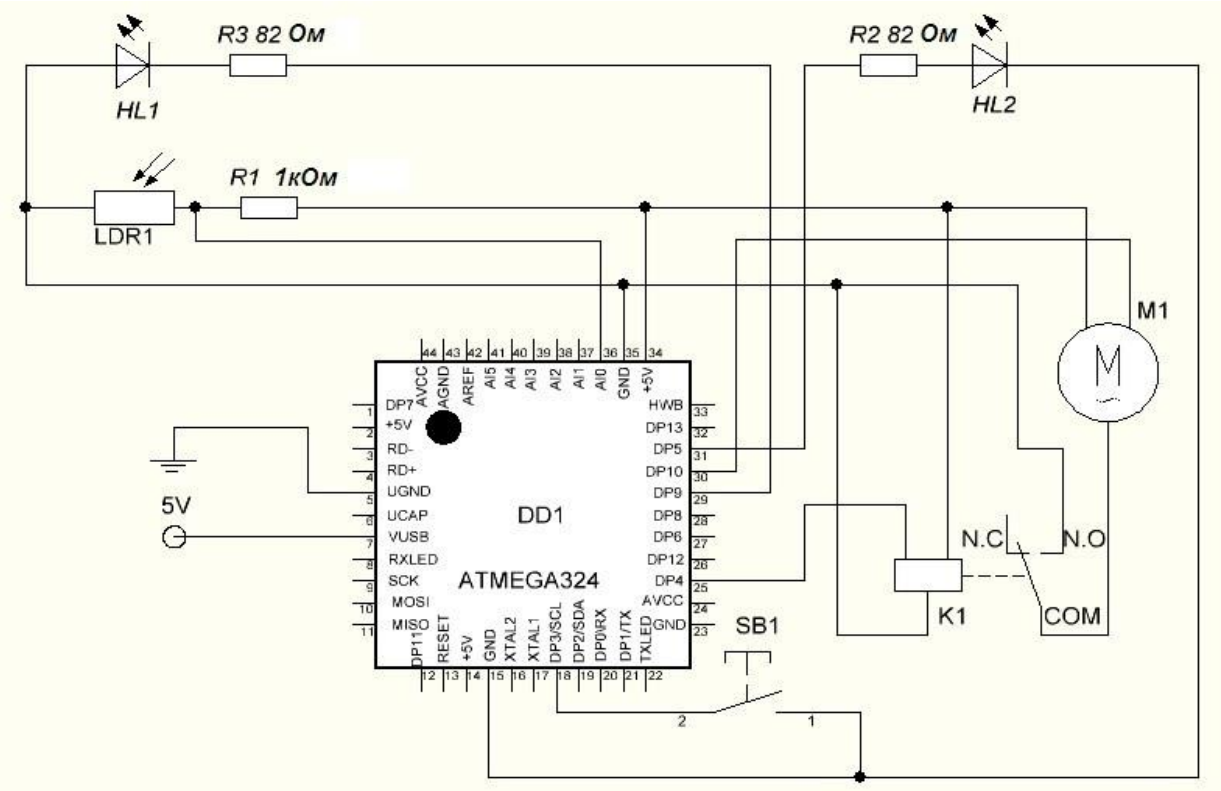


Рис. 1. Електрична схема комп'ютерно-інтегрованої системи освітлення

Так як положення вала виконавчого двигуна на початку роботи системи освітлення відповідає величині 0º, то вихідна напруга потенціометра менше заданої програмою величини, і не виконується

поставлена умова, жалюзі відкриті, а зовнішній світлодіод HL2, який імітує освітлювальний прилад, залишається вимкненим.

В результаті натискання кнопки S1 тактового перемикача відбувається вимикання внутрішнього світлодіода HL1 і світловий потік, який сприймається фоторезистором зникає. При цьому на вивід контролера AI0, який є аналоговим, подається вихідна напруга фоторезистора і відбувається її порівняння з величиною, заданою програмою.

В цьому випадку вихідна напруга фоторезистора має значення більше, ніж задане програмою. При цьому здійснюється визначення положення вала виконавчого двигуна, і перевіряється умова чи не перевищує воно 120º, або чи відкриті жалюзі. Оскільки на початку роботи жалюзі відкриті, а вал виконавчого двигуна займає положення, яке відповідає 0º, то настає виконання поставленої умови.

В результаті відбувається увімкнення зовнішнього світлодіода HL2 за допомогою цифрового виводу DP5, від DP4 подається керуючий сигнал на реле K1, COM і N.O. контакти якого замикаються. При цьому з виводу DP10 здійснюється подача керуючого сигналу на виконавчий двигун, який забезпечує поворот його вала з положення, яке відповідає величині 0 градусів до положення, яке відповідає величині 120º. В результаті цього жалюзі стають закритими, а контакти реле розімкненими.

Повторне натискання кнопки тактового перемикача призводить до увімкнення внутрішнього світлодіода HL1. При цьому величина напруги фоторезистора приймає значення менше того, яке задане програмою. Оскільки тепер вал виконавчого двигуна займає положення, яке відповідає величині 120º, то відбудеться його повернення в положення, яке відповідає величині 0º, тобто жалюзі повернуться у відкрите положення. При цьому відбудеться вимкнення зовнішнього світлодіода HL2, і система освітлення повернеться у вихідний стан.

Для програмування контролера Arduino Leonrado використане середовище Arduino IDE. Розроблена програма завантажується у контролер також за допомогою даного середовища. Мова Wiring середовища Arduino IDE розроблена на основі мов програмуваня C/C++ [10].

Створювані у середовищі Arduino IDE програми мають назву скетчів. При натисканні кнопки завантаження розробленого скетчу в контролер Arduino Leonrado, написаний код транслюється в мову програмування C. Далі компілятор avr-gcc здійснює остаточну трансляцію коду на мову, яка зрозуміла для мікроконтролера.

Алгоритм роботи системи освітлення, наведений на рис. 2, полягає у виконанні наступних кроків:

1. Здійснюється ініціалізація змінних. – Здійснюється ініціалізація режимів, у яких працюють виводи. – Оголошуються константи. – Здійснюється встановлення положення вала виконавчого двигуна, яке відповідає величині 0º. – Здійснюється увімкнення внутрішнього світлодіода.

2. Зчитуються дані, які подаються датчиком освітлення.

3. Перевіряється стан тактового перемикача. Якщо кнопка тактового перемикача була натиснута, здійснюється виконання пункту 4, якщо ні – здійснюється виконання пункту 5.

4. Перевіряється стан внутрішнього світлодіода. Якщо внутрішній світлодіод увімкнений, то здійснюється його вимикання, а якщо ні – то увімкнення.

5. Проводиться порівняння значень вихідної напруги, яка подається датчиком освітлення з встановленим програмою значенням. Якщо значення напруги фоторезистора більше значення, заданого програмою, здійснюється виконання пункту 6, якщо ні – виконання пункту 7.

6. Визначається положення вала виконавчого двигуна. Якщо воно відповідає величині менше 120º, то відбувається:

- увімкнення зовнішнього світлодіода;
- увімкнення реле;
- поворот вала виконавчого двигуна у положення, яке відповідає величині 120º;
- вимкнення реле.

Якщо ні – здійснюється виконання пункту 2.

7. Якщо положення вала виконавчого двигуна знаходиться у положенні, яке відповідає величині 120º, то відбувається:

- вимкнення зовнішнього світлодіода;
- увімкнення реле;
- поворот вала виконавчого двигуна у положення, яке відповідає величині 0º;
- вимкнення реле.

Якщо ні – здійснюється виконання пункту 2.

З метою отримання програмного доступу до значень вихідної напруги, яку видає фоторезистор, використано дільник напруги в способі підключення фоторезистора до схеми лабораторної установки (рис. 3).

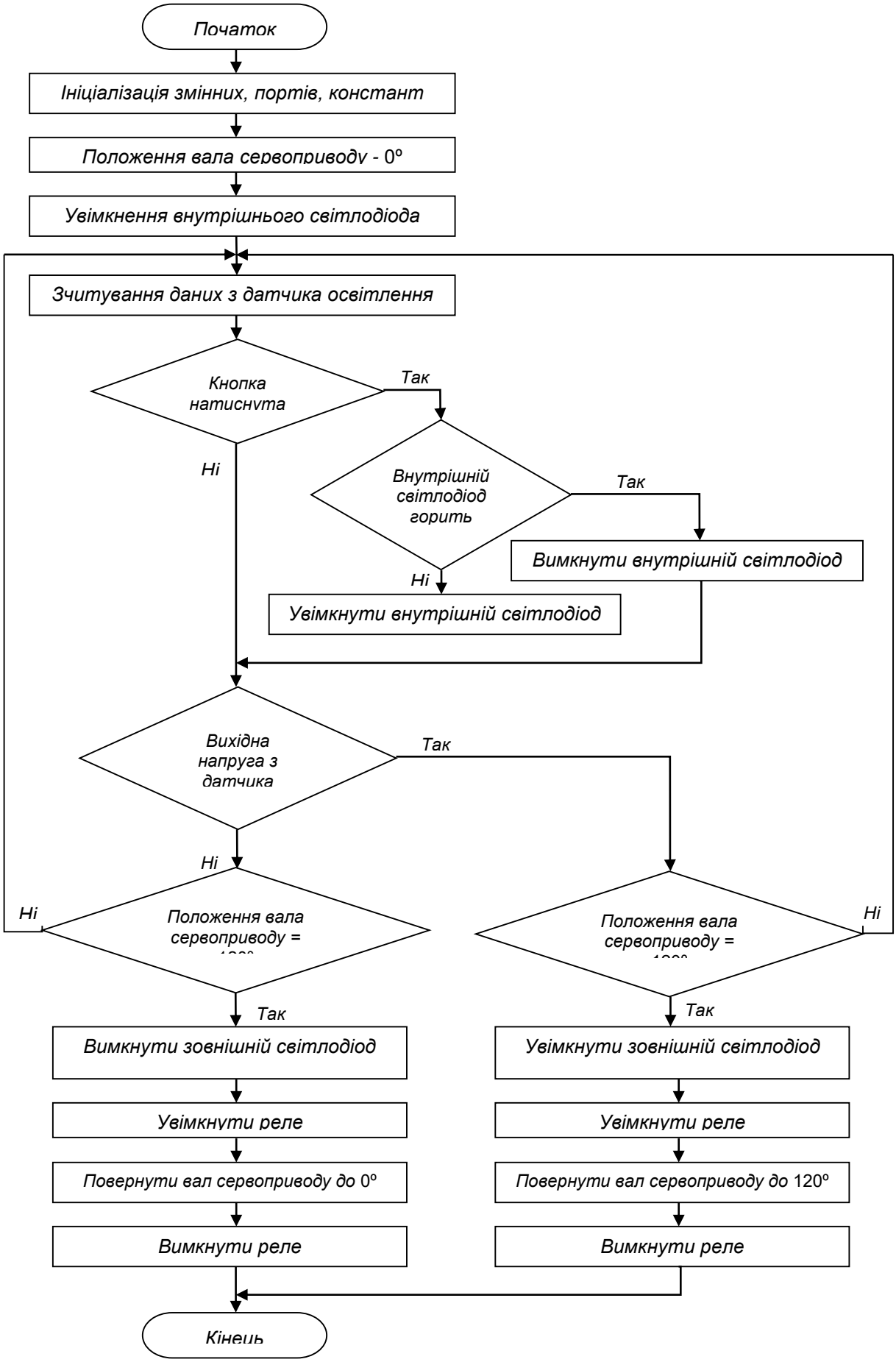


Рис. 2 Алгоритм роботи системи освітлення

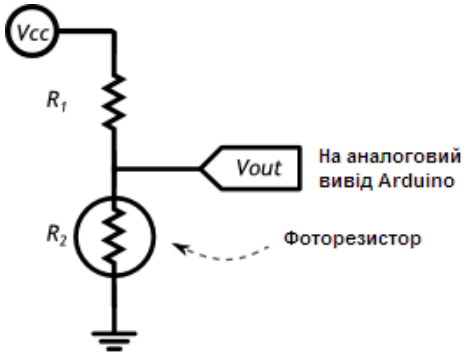


Рис. 3. Спосіб підключення фоторезистора

Величина сили струму, який проходить через обидва резистори, з'єднані послідовно, одна і та ж сама і визначається відповідно до закону Ома у вигляді:

$$I = \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

де V_{cc}– величина вхідної напруги; R_1 і R_2 – опори резистора і фоторезистора відповідно.

Падіння напруги на фоторезисторі можна також визначити за допомогою закону Ома:

$$V_{out} = I \cdot R_2 = \frac{R_2 \cdot V_{cc}}{R_1 + R_2} \quad . \quad (2)$$

З виразу (2) витікає, що із збільшенням опору R_2 по відношенню до опору R_1 падіння напруги на фоторезисторі збільшується.

Серед можливостей контролера Arduino є здатність вимірювання напруги, яка визначається аналоговими датчиками. З цією метою використовується analogRead функція. У випадку, коли датчик підєднується до виводу Arduino A0, для перетворення величини сигналу, отриманого за допомогою датчика, у змінну необхідно використати команду int value = analogRead (A0).

Отримані дані можна представити візуально на моніторі. Для цього монітор з'єднується з послідовним портом шляхом використання команди Serial.begin(rate). При цьому здійснюється відкриття послідовного порту і встановлюється швидкість, з якою передаються дані.

З метою відображення даних, які надходять з контролера Arduino на персональний комп'ютер за допомогою послідовного інтерфесу USB, використано програму Монітор.

Таким чином, дані, які зчитуються, виводяться на екран монітора за допомогою команди Serial.begin(rate) шляхом передачі даних через послідовний порт. При цьому відбувається автоматичне повернення каретки і перехід до нового рядка.

Для читання даних необхідно після завантаження програми в контролер Arduino натиснути на кнопку Монітор порту, яка знаходиться в правій верхній частині вікна програми.

З метою моделювання зміни інтенсивності світлового потоку природного освітлення у лабораторній установці здійснюється зміна яскравості випромінювання світлодіода, яка при проведенні досліду збільшується в межах 0%…100% поступово. При цьому на екрані монітора відображається стрічка led_in brightness 0%, 20%,… Таким чином подається інформація щодо яскравості внутрішнього світлодіода led_in, який імітує денне світло. При цьому за кожним рівнем яскравості виводяться цілочисленні значення у вигляді п'яти рядків вихідної напруги фоторезистора, яка вимірюється.

Оскільки вхідна напруга контролера Arduino може коливатися в діапазоні 0…5 В, то програмою здійснюється перетворення цих даних у цілочисельні значення в діапазоні 0…1023. Крім того, спостерігається коливання виведених значень навколо одного числа, а саме 150, під час випромінювання світлодіодом світла, яке складає 20% від максимальної яскравості led_in brightness20%.

У зв'язку з цим, при кожному рівні яскравості зчитуються 6 виведених значень з подальшим визначенням середньоарифметичного значення для кожного рівня яскравості, яке буде являти собою вхідну напругу у вигляді

$$\overline{V}_{out(цифр.)} = \frac{\sum_{i=0}^{n} V_{out(i)}}{n}, \quad (3)$$

де $V_{(out(i))}$ − значення вхідної напруги для даного рівня яскравості; n = 6 − кількість значень, виведених для даного рівня яскравості.

Процедура дослідження роботи пари внутрішній світлолодіод-фоторезистор включає у себе виконання наступних кроків:

1. Підключення контролера Arduino Leonardo до персонального комп'ютера через USB кабель.

2. Відкриття на персональному комп'ютері програмного середовища Arduino IDE. Ідентифікація COM порту за допомогою Диспетчера пристроїв Windows і встановлення відповідного номера всередині середовища Arduino IDE.

3. Копіювання скетчу для проведення дослідження в середовище Arduino IDE.

4. Завантаження скетчу в контролер шляхом натискання кнопки панелі інструментів Завантажити. Після кількасекундної паузи перевірка наявності повідомлення про успішне завантаження.

5. Відкриття у правій верхній частині вікна Монітор порту.

6. Контроль виведення усіх значень вихідної з фоторезистора напруги у відповідності до різних рівнів яскравості світлодіода.

8. Занесення усіх отриманих значень в таблицю 1.

9. Закриття вікна Монітор порту і від'єднання USB кабелю від персонального комп'ютера.

10. Розрахунок середньоарифметичних значень вихідної напруги фоторезистора з використанням формули (3) і занесення отриманих значень в табл. 1.

11. Переведення отриманих даних у цифровому форматі до аналогових значень вихідної напруги з фоторезистора з використанням формули:

$$\overline{V}_{out(аналог.)} = \frac{\overline{V}_{out(цифр.)} \cdot 5}{1023} \quad (4)$$

12. Занесення аналогових значень вихідної з фоторезистора напруги у табл. 1.

13. Побудова графічної залежності вихідної напруги фоторезистора від яскравості внутрішнього світлодіода.

Таблиця 1

Результати дослідження

Ф, %	$V_{out(i)}$						$\overline{V}_{out(цифр.)}$	, В
	1	2	3	4	5	6		
0	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	5
20	749	744	739	735	731	726	737	3,6
40	650	644	638	632	626	620	635	3,1
60	604	600	596	592	588	584	594	2,9
80	558	556	554	552	550	548	553	2,7
100	517	515	513	511	509	507	512	2,5

Отримана графічна залежність вихідної з фоторезистора напруги від яскравості внутрішнього світлодіода наведена на рис. 4.

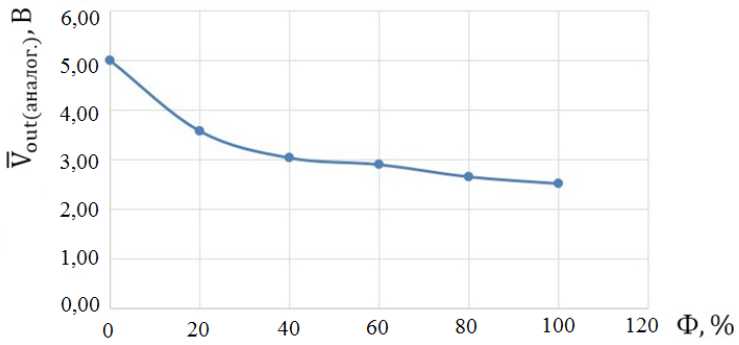


Рис. 4. Графік залежності вихідної напруги фоторезистора від яскравості внутрішнього світлодіода

При поступовому збільшенні яскравості внутрішнього світлодіода з 0% до 40% світлового потоку величина вихідної напруги фоторезистора зменшується. При подальшому збільшенні яскравості внутрішнього світлодіода вихідна напруга фоторезистора монотонно зменшується, хоча з меншою інтенсивністю.

Як видно з рис. 5, при відсутності світлового потоку від внутрішнього світлодіода до фоторезистора вихідна напруга фоторезистора приймає максимальне значення 5 В.

Найбільшій 100% яскравості світлодіода відповідає найменше значення вихідної напруги фоторезистора 2,5 В.

Висновки

Розроблено комп'ютерно-інтегровану схему керування освітленням розумного будинку з оптимальною структурою, яка дозволяє використовувати її в якості лабораторної установки. Лабораторна установка дозволяє проводити дослідження режимів роботи системи в режимі імітації змін світлого та темного періодів доби. При цьому протягом світлої доби використовується природне освітлення за рахунок автоматичного відкриття жалюзі, а протягом темного періоду вмикається автоматично штучне освітлення і закриваються жалюзі.

В процесі створення програмного забезпечення системи керування освітленням розроблено

керуючий алгоритм, що відображає логічну послідовність реалізації режимів її роботи. В середовищі Arduino IDE створено керуючу програму, або скетч, на мові програмування Wiring для завантаження в контролер Arduino Leonardo, використовуючи персональний комп'ютер з USB інтерфейсом.

В результаті проведеного експериментального дослідження підтверджено працездатність розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи освітлення розумного будинку. Отримана експериментальна залежність вихідної напруги фоторезистора від яскравості внутрішнього світлодіода підтверджує достовірність прийнятих вихідних положень в процесі створення програмного забезпечення розробленої системи освітлення.

Література

1. Гололобов В. Н. Умный дом своими руками / Гололобов В. Н. – М. : НТ Пресс, 2007. – 416 с.

2. Elsenpeter R. C., Velte, T. J. Build your own smart home. McGraw-Hill/Osborne, 2003. 360 p.

3. Що таке розумний будинок: огляд системи розумного дому Smart Home в Україні. Система розумний будинок : веб-сайт. – URL : https://kolecs.lviv.ua/systema-rozumnyi-budynok/.

4. Василенко В. І. Особливості побудови інтелектуальних енергетичних систем будівель та споруд / В.І. Василенко, І.А. Ремізов // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS : зб. матеріалів IV міжнар. наук.-техн. конф., 4–7 черв. 2019 р. – К. : НТУУ «КПІ», 2019. – С. 21-22.

5. Javed A. Building Arduino. Projects for the Internet of Things. Experiments with Real-World Applications. USA: Apress Media, LLC, 2016. 244 p.

6. Blum J. Arduino: Exploring Arduino: tools and techniques for engineering wizardry. 2nd edition. Wiley & Sons, 2019. 512 p.

7. Oxer J., Blemings H. Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware. Berkeley, CA: Apress, 2009. 423 p.

8. Evans B. Beginning Arduino programming: Writing code for the most popular microcontroller board in the world. New York, NY: Apress, 2011. 252 p.

9. Margolis M. Arduino Cookbook. O'Reilly Media, 2011. 632 p.

10. Stroustrup B. A Tour of C++. Addison-Wesley Professional, 2018.

References

1. Gololobov V. N. Umnyj dom svoimi rukami / Gololobov V. N. – M. : NT Press, 2007. – 416 s.

2. Elsenpeter R. C., Velte, T. J. Build your own smart home. McGraw-Hill/Osborne, 2003. 360 p.

3. Shcho take rozumnyi budynok: ohliad systemy rozumnoho domu Smart Home v Ukraini. Systema rozumnyi budynok : veb-sait. – URL : https://kolecs.lviv.ua/systema-rozumnyi-budynok/.

4. Vasylenko V. I. Osoblyvosti pobudovy intelektualnykh enerhetychnykh system budivel ta sporud / V.I. Vasylenko, I.A. Remizov // Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku – PEMS : zb. materialiv IV mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 4–7 cherv. 2019 r. – K. : NTUU «KPI», 2019. – C. 21-22.

5. Javed A. Building Arduino. Projects for the Internet of Things. Experiments with Real-World Applications. USA: Apress Media, LLC, 2016. 244 p.

6. Blum J. Arduino: Exploring Arduino: tools and techniques for engineering wizardry. 2nd edition. Wiley & Sons, 2019. 512 p.

7. Oxer J., Blemings H. Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware. Berkeley, CA: Apress, 2009. 423 p.

8. Evans B. Beginning Arduino programming: Writing code for the most popular microcontroller board in the world. New York, NY: Apress, 2011. 252 p.

9. Margolis M. Arduino Cookbook. O'Reilly Media, 2011. 632 p.

10. Stroustrup B. A Tour of C++. Addison-Wesley Professional, 2018.

Надійшла / Paper received : 11.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-72-80
УДК 004.8:621.396.9

І.С. БУРЛАЧЕНКО, В.Ю. САВІНОВ, О.Р. ТОГОЄВ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв

МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ЯК ХОСТІВ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто методи визначення позиціонування рухомих об'єктів у просторі. Показано, що локалізація об'єктів на основі Wi-Fi є одним з найпопулярніших рішень і вважається найбільш перспективним. Теоретично обґрунтовано та розглянуто практичну реалізацію WiFi-сніфферу для визначення розташування рухомих об'єктів, підключених до бездротової мережі. Розроблено алгоритм фіксації розташування об'єктів шляхом їх ідентифікації за допомогою нейронної мережі з використанням запропонованої мультиагентної моніторингової системи.

Ключові слова: *Wi-Fi сніффер, позиціонування рухомого об'єкта, мультиагентна моніторингова система, модель довгострокової пам'яті.*

IVAN BURLACHENKO, VOLODYMYR SAVINOV, OLEKSII TOHOIEV
Petro Mohyla Black Sea National University

MULTIAGENT SYSTEM FOR POSITIONING OF MOBILE OBJECTS AS WIRELESS NETWORK HOSTS

The purpose of the work is to theoretically substantiate and practically implement the capabilities of WiFi-sniffing to determine the location of objects. Also, it was set a aim to develop an algorithm for fixing the location of moving objects connected to a wireless network by identifying them using a neural network. The expediency of using a comprehensive positioning technology based on IEEE 802.11 (Wi Fi) and a multi-agent approach was substantiated to solve the task of positioning and identification. The proposed multiagent approach takes into account the multifaceted nature of the radio channel when calculating the characteristics of the signal during communication of moving objects direct and through access points (AP). The authors proposed a model based on long short-term memory (LSTM), which was included as a directional acyclic graph (DAG) layer and used to identify the behavior of agents of a multi-agent monitoring system (MAMS). To solve the problem of categorization, it was proposed using the Keras model in agent logic based on subnet addresses and agent categories. The developed software allows to track moving objects (smartphones or other gadgets) that are in different segments of the network in relation to a router and host sniffer. These theoretical calculations are confirmed in practice to determine the location of moving objects having access to the Internet - via Wi-Fi or Ethernet - as mobile devices. According to the obtained data, the proposed model has showed 98.7% accuracy in classification. In addition, with this approach, it is possible to reduce the number of calculations in the model. It was also considered the alternative methods for determining the positioning of moving objects in systems with a high level of information security, which exclude the possibility of radio communication.

Keywords: *Wi-Fi Sniffer, Positioning of Mobile Objects, Multiagent Monitoring System (MAMS), Long Short-Term Memory (LSTM)*

Постановка проблеми

Системи визначення позиціонування рухомих об'єктів у просторі вже довели ефективність для бізнесу при роботі на відкритій місцевості, у контролі переміщення транспорту, у стратегічних й тактичних задачах військової галузі. У цивільних застосуваннях вбудований GPS в мобільних телефонах допомагає не тільки їх користувачам, але і компаніям, що пропонують товари і послуги за територіальним принципом.

На сьогоднішній день науковцями і практиками здійснено значну кількість досліджень проблеми розгортання системи позиціонування мобільних пристроїв. Їх аналіз засвідчив, що похибка існуючих методів становить від 1,78 до 10 м. Дослідниками розглянуті різні аспекти і грані методів позиціонування і навігації [1]. Найбільш поширеними, класичними, є технології позиціонування за допомогою супутникових систем (наприклад, GPS і Galileo) і наземних стільникових мереж.

Невирішеними повністю, актуальними залишаються задачі знаходження кінцевих меж точності систем позиціонування, які визначаються присутністю шумів і перешкод; опис роботи ряду нових методів, таких як пряме позиціонування, які спрямовані на забезпечення роботи GPS з дуже слабкими прийнятими радіосигналами (наприклад, в приміщенні); а також методи оптимального поєднання вимірювань на основі радіосигналів і сигналів з різних датчиків, наприклад інерційних платформ (зокрема, з гіроскопів).

Перспективними також є дослідження у нових галузях спільного (кооперативного) позиціонування, в якому багато вузлів обмінюються сигналами та інформацією, щоб підвищити точність своїх позицій. Трендом у сучасній науці є абсолютно нова галузь досліджень – суперточна дальнометрія в закритих приміщеннях з використанням сигналів з ультраширокою пропускною здатністю.

В останнє десятиліття локалізація об'єктів на основі Wi-Fi стала одним з найпопулярніших рішень і вважається найбільш перспективним для вивчення порушених питань як у наукових, так і в промислових спільнотах.

Основною концепцією бездротової мережі Wi-Fi є наявність точки доступу (AP), яка підключається до Інтернет-провайдера та передає радіосигнал. Зазвичай AP складається з приймача, передавача, інтерфейсу кабельної мережі та програмного забезпечення для швидкої настройки. Навколо AP утворюється мережа в радіусі 50–100 метрів (яка називається хот-спотом або зоною Wi-Fi), в межах якої можна використовувати бездротову мережу. Відстань передачі залежить від потужності передавача (програмно налаштованого в деяких моделях обладнання), наявності та характеристик перешкод типу антени. Сьогодні широко застосовується стандарт 802.11n, який забезпечує швидкість передачі даних до 320 Мбіт/с [2].

Методи позиціонування на основі Wi-Fi можна розділити на дві основні групи. Одна заснована на картографії та картографічному каталозі (англ. CC) [3], а друга – на моделюванні поширення радіохвиль (англ. RF) [4]. Модель RF визначає залежність між силою сигналу та відстанню. Для визначення відстані між відомими точками та мобільним пристроєм можливо використовувати алгоритми трилатерації [5].

Однак, на теперішній час для цього потрібно кілька десятків вимірювань, щоб визначити залежність між відстані та силою сигналу. Звідси випливає, що ця модель не є повністю динамічною і потребує подальших досліджень та вдосконалення.

Мета дослідження

Мета роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичній реалізації можливостей WiFi-сніффінгу щодо визначення розташування об'єктів та розробка алгоритму фіксації розташування рухомих об'єктів, підключених до бездротової мережі, шляхом їх ідентифікації за допомогою нейронної мережі.

Відповідно до мети були визначені наступні **завдання дослідження**:

1) проаналізувати тенденції розвитку методів на основі радіохвиль в напрямку реалізації проектів визначення позиціонування рухомих об’єктів у 2D- та 3D-просторі;

2) обґрунтувати доцільність та здійснити розвиток мультиагентного підходу для моніторингу численних об'єктів у бездротовій корпоративній мережі;

3) розробити алгоритм фіксації розташування рухомих об'єктів, підключених до бездротової мережі, на основі комплексного підходу до визначення позиціонування та ідентифікації таких об’єктів;

5) визначити межі застосування різних методів визначення місцеположення рухомих об'єктів у системах з підвищеним рівнем інформаційної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розглянемо позиціонування на основі моделювання поширення радіохвиль (англ. RF). Мета такого моделювання – виразити математичну залежність між відстані від приймача до передавача та силою сигналу. Математичний вираз отримують з поліноміальної регресії третього порядку. Основна перевага цієї технології в швидкості позиціонування. Крім того, важливим моментом є те, що точки доступу (англ. AP) є нерухомими з відомими координатами (рис. 1). Актуальною проблемою є розробка методів визначення місця розташування користувача на основі поєднання характеристик сигналів з AP.

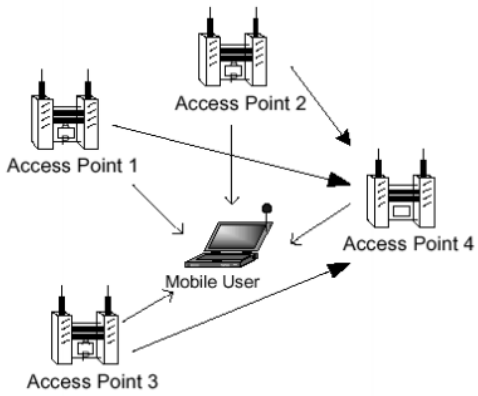


Рис. 1. Рухомий об'єкт (Mobile User) у системі з нерухомими точками доступу (Access Point)

Однак, регресія потребує великої кількості точної інформації про силу сигналу протягом досить тривалого часу. Ця методика забезпечує точність позиціонування від 1 м до 3 м. Для оцінки ефективності технологій позиціонування використовується інтегральний квадратичний критерій якості [6].

Для відстеження переміщення користувачів у будівлях також використовується радіочастотна система RADAR [7]. RADAR працює, записуючи та обробляючи інформацію про потужність сигналу на декількох базових станціях, розміщених у зоні зацікавленості для забезпечення покриття, що перекривається. За допомогою технології RADAR, мобільний пристрій використовує CC-мапу необхідного місця. Оригінальна CC-мапа формується з координат, CC-вимірювань та місця розташування мобільного пристрою [8]. Сила сигналу від кожної точки AP порівнюється з відповідними показниками в базі даних і передбачається відповідне розташування. Середня похибка цього методу становить 1,78 м, але максимальна похибка може бути до 40 м [7].

Таким чином, якщо необхідно визначити місцеположення рухомого об’єкта з точністю до приміщення, у такому разі необхідно звернутися до інших методів позиціювання такого об’єкта.

Сніффінг рухомих об’єктів, підключених до бездротових мереж

Для позиціонування в локальних координатах (для визначення руху клієнтів, внутрішньоскладської логістики тощо) використовується обладнання з вбудованим Wi-Fi, RFID-, Bluetooth-модулями, а також акселерометри, компаси, антени для смартфонів [2, 8].

Однак, дані з цих модулів перешкоджають як реєстрації, так і для аналізу. Імовірнісні технології використовують розподіл ймовірності сили сигналу для кожної опорної точки з показниками вище середнього. Наприклад, Ekahau Positioning Engine (EPE) використовує дві функції оцінювання для координації вимірювань з базою даних. Перша функція обчислюється методом ядра, а друга функція обчислюється методом гістограми [9]. Порівняння ефективності обробки різних алгоритмів позиціонування на Intel (R) Core (TM) i7 920 на 2,67 ГГц наведено на рис. 2 для 10^6 випробувань.

Система HORUS базується на логіці Байєса [10]. Основною його особливістю є групування даних, що зменшує обчислювальні витрати та час, необхідний для визначення місця розташування рухомого пристрою, підключеного до точки доступу. Такий підхід також є імовірнісним. Кожна опорна точка містить вибірку з 240 вимірювань. Зразки зберігаються у вигляді гістограми, кожна з яких об'єднує всі AP в спільний розподіл.

Схема мережі Wi-Fi містить не менше однієї точки доступу AP та може легко масштабуватись.

Також можливе підключення двох клієнтів в режимі точка-точка (Ad-hoc), коли точка доступу не використовується, а клієнти з'єднуються за допомогою мережевих адаптерів «напряму». Точка доступу передає свій ідентифікатор мережі (англ. SSID) з допомогою спеціальних сигнальних пакетів на швидкості 0,1 Мбіт/с кожні 100 мс. Тому 0,1 Мбіт/с – найменша швидкість передачі даних для Wi-Fi. Знаючи SSID мережі, клієнт може з'ясувати, чи можливе підключення до даної точки доступу. При потраплянні в зону дії двох точок доступу з ідентичними SSID, приймач може вибирати між ними на основі даних про рівень сигналу. Стандарт Wi-Fi дає клієнту повну свободу при виборі критеріїв для з'єднання.

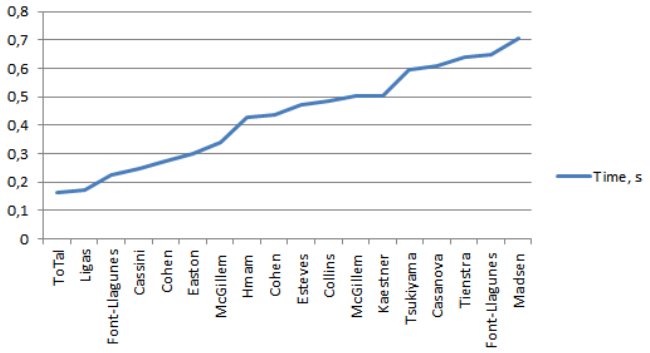


Рис. 2. Порівняння ефективності різних алгоритмів позиціонування

В останнє десятиліття локалізація об’єктів на основі Wi-Fi стала одним з найпопулярніших рішень і вважається найбільш перспективним для вивчення порушених питань як у наукових, так і в промислових спільнотах [11]. Потрібно кілька десятків вимірювань, щоб визначити залежність між відстані та силою сигналу. Звідси випливає, що розглянуті моделі не є повністю динамічними.

Метод мультиагентного аналізу позиціонування рухомих об’єктів

Існуючі мобільні методи позиціонування, які призначені для нерухомого об’єкта, не дозволяють зафіксувати рухомі об'єкти, і вони не потраплятимуть на WiFi-сніффер. Вирішити проблему покращення позиціонування хостів, що рухаються в бездротових мережах, можливо шляхом ідентифікації, здійсненої за допомогою нейронної мережі.

Дослідження показують, що системи на основі трилатерації характеризуються меншими помилками розташування порівняно з байєсівським підходом [12]. Однак з представлених результатів видно, що в середньому в 10 % випадків мобільний об’єкт буде незахищеним, коли користувач працює в корпоративній мережі [13]. У цьому випадку важливо враховувати багатосторонній характер радіоканалу при обчисленні характеристик сигналу під час прямого зв'язку рухомих об'єктів та зв'язку через точки доступу [14].

Для перегляду конкретних даних про трафік, що агент $A^{s}_{m(i)}$ надсилає у мережу, необхідно більше агентів $A^{sn}_{m(i)}$ зі спеціальною роллю сніфферів. Іноді на хост H_{RoA} може бути встановлено мультиагентне програмне забезпечення для моніторингу (1):

$$RoA = \left\{ \; j \in RoA \;\middle|\; A^{j}_{m(i)} \right\}, \tag{1}$$

де RoA – сукупність поведінки агентів. Це найбільш надійний спосіб, але він не завжди доступний. Якщо H_{RoA} підключений до бездротової мережі, тоді він може використовувати додаткові пристрої-агенти $m(i)$. Це означає, що $m(i)$ з роллю сніффера буде підключений через Wi-Fi до маршрутизатора або до хоста-агента. Якщо немає доступу до маршрутизатора через Wi-Fi, необхідно підключити H_{RoA} до незахищеної WiFi-мережі та проаналізувати всі дані про трафік від інших рухомих хостів-агентів (2):

$$RoA_B = \{m(i-k_{lb}), \ldots m(i), \ldots m(i+k_{rb}) \,|\, (k_{lb}, k_{rb}) \in B\}, \tag{2}$$

Розглянемо найбільш типовий випадок, коли корпоративна мережа контролюється звичайною Wi-Fi точкою доступу (англ. Access Point або AP). Більшість корпоративних AP працюють з широко розповсюдженими операційними системами (ОС), до яких агенти мультиагентної моніторингової системи (англ. Multiagent Monitoring System або MAMS) без проблем підключаться, наприклад, через протокол Telnet.

Цей експеримент призначений для вивчення процесу перенаправлення трафіку з рухомих агентів (або з будь-якого іншого хоста в мережі) на агент з роллю сніффера для аналізу H_{RoA} шляхом моніторингу (рис. 3).

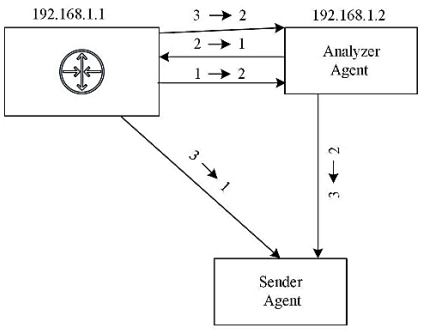


Рис. 3. Блок-схема взаємодії між рухомими агентами у підмережі

Мережевий маршрутизатор у якості агента був зконфігурований на базі ОС Linux. Цей агент може бути налаштований засобами API на борту і має мережеву IP-адресу 192.168.1.1. Агент-аналізатор містить *iptables* and *iproute2* утиліти та сніффер *tcpdump*, завдяки яким він може вирішувати всі мережеві задачі. Агент-аналізатор має IP-адресу 192.168.1.2. Пристрій H_{RoA} виступає Агентом-відправником, що підключений до мережі та має IP-

адресу 192.168.1.3.

План дослідження використовує таблицю маршрутизації *iproute2*. Крім того, на маршрутизаторі створюється окрема таблиця маршрутизації і правило, яке використовуватиме її для всього трафіку від рухомих агентів (рис. 4). В таблиці зазначається шлях за замовченням – хост з роллю Агента-сніффера (Sniffing Agent Role). Заборонено зазначати два правила з однаковим пріоритетом. Тобто, в першу чергу потрібно перевірити, чи є ще одне правило з таким же пріоритетом у *ip rule list.*

Доцільно вибрати менше число для зазначення пріоритету – чим менше значення, тим вище пріоритет. Перші 4 цифри вважаються зайнятими та не використовуються. Можливо обрати будь-яку невикористану таблицю *($TBL)*. Чи таблиця вже використовується, можна переглянути за допомогою команди *ip route list table $TBL*.

Хост з роллю Агента-сніффера повинен переправляти весь трафік, що досліджується, до мережі, наприклад, за допомогою механізму NAT. Крім того, цей трафік буде легко проходити через один і той же маршрутизатор і відправлятися до місця призначення, оскільки зараз IP-пакети мають іншу адресу відправника, і він не потрапить у нашу таблицю маршрутизації. На хості H_{RoA} можна запустити Агент-аналізатор та фільтрувати трафік за IP-адресою 192.168.1.3.

Але ця схема має суттєвий недолік: трафік, який був призначений для самого Агента-маршрутизатора (Router Agent Role), не потрапить на сніффер. Для вирішення цієї проблеми використовується роль Агента-сніффера, як показано на рис. 4. Судячи зі схеми з таблиці маршрутизації *iptables* від MAMS, оскільки в результаті маршрутизації цей трафік буде перенаправлений (на праву гілку), потрібно змінити його адресу призначення у *PREROTING*: 192.168.1.3.

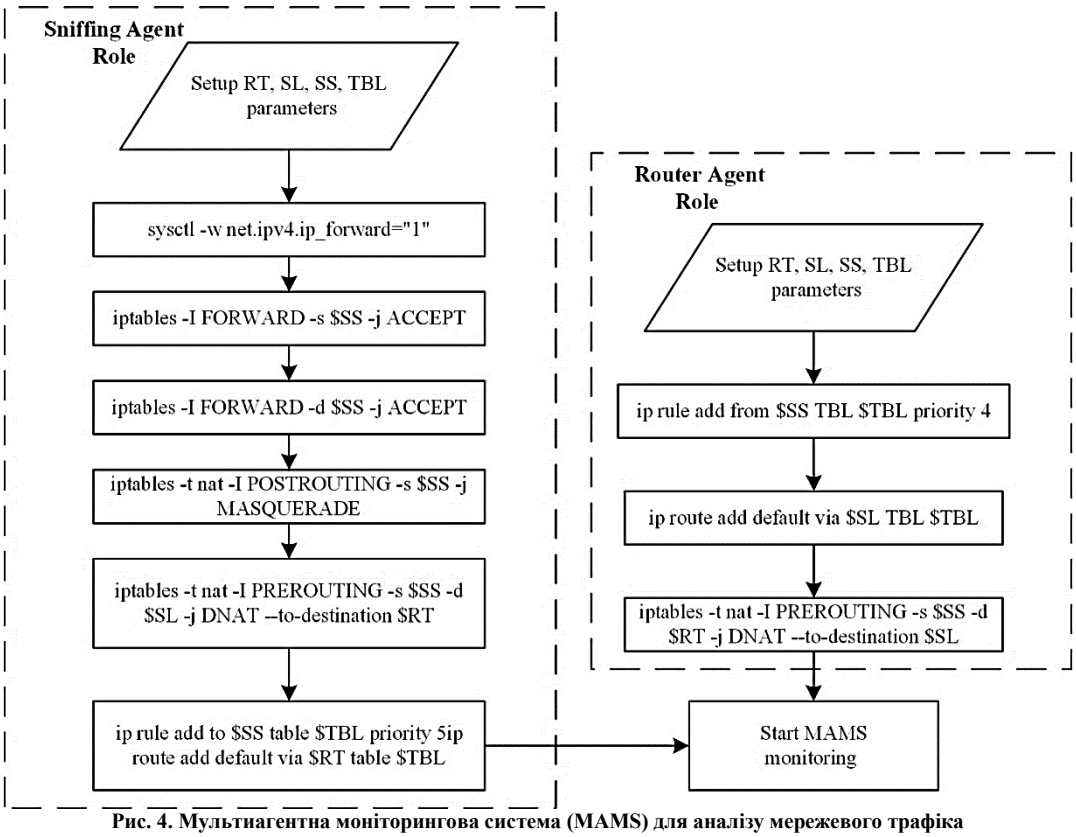


Рис. 4. Мультиагентна моніторингова система (MAMS) для аналізу мережевого трафіка

Необхідно зауважити, що на Агенті-сніффері на хості H_{RoA} трафік потрапить під маскування (*MASQUERADE*), тобто адреса відправника також зміниться для пакетів. В результаті, пакети повинні рухатися за схемою, наведеною на рис. 3.

Однак ця опція не буде працювати, якщо хости H_{RoA} знаходяться в одному сегменті, а маршрутизатор працює як мережевий міст. Тоді, згідно з таблицею маршрутизації, на хості Агента-аналізатора, зворотний трафік буде направлений безпосередньо одержувачу, в такому разі, ОС одержувача повинна ігнорувати трафік, оскільки адреса відправника буде не тією, з якою встановлено з'єднання.

Запропонований метод був реалізований у модулі RoA_B мультиагентної моніторингової системи MAMS. Відповідно до індексів k_{lb}, k_{rb} діапазону з ролями агентів RoA_B знову перенаправляє ці пакети до маршрутизатора, аналогічно тому, як було зроблено перенаправлення на сніффер.

Коли MAMS отримує проблемний трафік, пристрій H_{RoA} з роллю Агент-маршрутизатор, що

використовує штатний механізм (модуль *nf_conntrack*), розпізнає змінені підключення з DNAT в них та і замінює адресу отримувача пакетів на вихідну. Далі пакети надсилаються одержувачу так, ніби нічого не сталося.

Практичне визначення місцеположення рухомих об'єктів за методом мультиагентного аналізу

Застосування мультиагентного підходу дозволяє аналізувати функціональні властивості всіх агентів у мережі. Таким чином, це дає можливість досліджувати проблему автоматичного класифікації агентів на багато категорій під час встановлення кількох з'єднань у різних сегментах мережі (рис. 5).

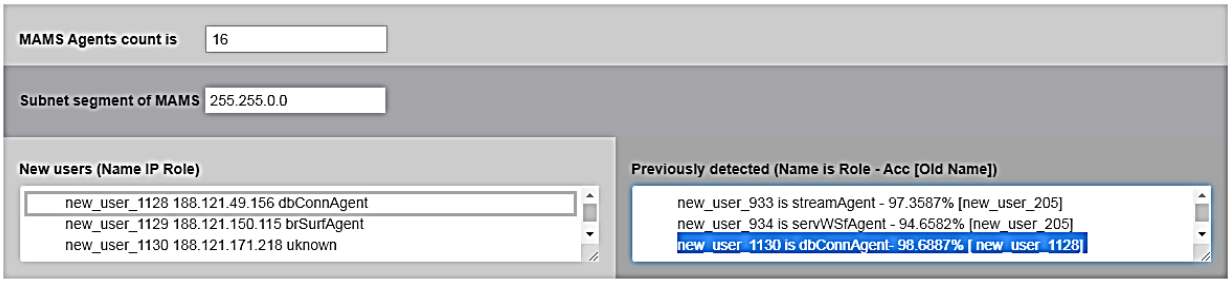


Рис. 5. Користувацький інтерфейс запропонованої MAMS під час визначення ролі нового користувача та позиціонування у мережі

В якості вихідних даних для машинного навчання був наданий набір даних (dataset), що містить біля 10 тисяч мережевих пакетів від MAMS, поділених на 8 категорій відповідно до діяльності мережі агентів, розподілених між 256 мережевими сегментами. Корисне навантаження (payload) мережевих пакетів є нерівномірним та поділяється на категорії, назви яких були приховані навмисно, оскільки ці дані не можуть бути відображені.

Елементи, які агент отримує з корисного навантаження пристроїв H_{RoA}:

$$A_H^{PL} = \{A_{DA}, A_{DO}, A_{IDs}, A_{DAl}, A_{DSD}, A_{NC}, A_{CD}\}, \quad (3)$$

де A_{DA} описує атрибути пристрою: інформацію щодо ОС, версії апаратного та програмного забезпечення, рівень заряду батареї, потужність сигналу, вільний обсяг на накопичувачі, тип браузера, назви та тип застосунків, файлів та програмні плагіни (plugins);

A_{DO} – інформація про роботу пристрою та його поведінку під час використання;

A_{IDs} описує ідентифікатори (ID): індивідуальні ID рухомих об'єктів, ID пристроїв, ID ігор, застосунків, використовуваних аккаунтів, унікальні ідентифікатори програмного забезпечення для одного пристрою чи облікового запису;

A_{DAl} – сповіщення пристроїв: Bluetooth-сповіщення, а також інформація про закриті точки доступу, маячки та мобільні вежі;

A_{DSD} – використовується для зберігання даних щодо налаштувань пристрою. Інформація, яку дозволено отримувати через налаштування пристрою, така як доступ до даних GPS, камер або знімків;

A_{NC} – інформація про мережу та її підключення: інформація про оператора або провайдера мережі, мову, часовий пояс, номер мобільного телефону, IP-адресу, швидкість з'єднання, а в деяких випадках і інформація про інші мережі H_{RoA} поблизу;

A_{CD} – дані cookie: cookie, що зберігаються в H_{RoA}, включаючи ідентифікатори файлів cookie та настройки cookie.

Класифікація категорій агентів у бездротовій підмережі за допомогою моделі на основі довгострокової пам'яті

Після того, як буде визначено контрольоване навчання для агентів $A_{m(i)}^{sn}$, такі рішення можуть бути поширені на агентів $A_{m(i)}^{sn}$ на різних H_{RoA}. Така задача для інших агентів з подібними ролями вирішується алгоритмом, наведеним на рис. 6.

Суть завдання визначення класифікаційної категорії агента, коли агенти з'являються в іншому сегменті мережі після його попередньої підготовки та очищення, полягає у складанні словника всіх функцій, доступних у текстах корисного навантаження A_H^{PL}, заміні кожної категорії цифрою – унікальним номером слова у словнику, вирівнюванні довжини кожної категорії та сегментів мережі відповідно до потрібного розміру (зазвичай це кількість елементів у векторі найдовшої функції). Тоді будь-який алгоритм класифікації може бути застосований до даних, представлені у цій формі. В розглянутому випадку необроблені дані були представлені в системі керування базами даних (СКБД або англ. DBMS) *MariaDB*.

Зазначені дані успішно завантажені до *Pandas DataFrame*.

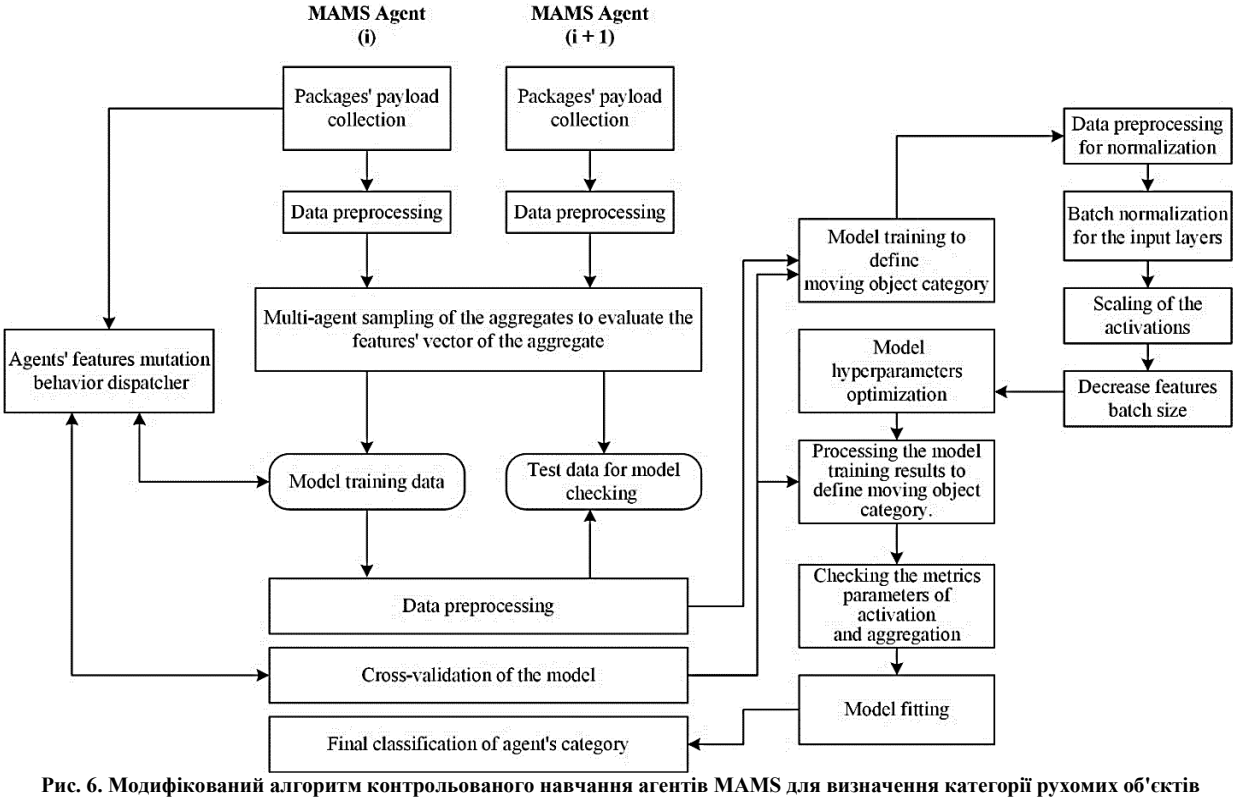


Рис. 6. Модифікований алгоритм контрольованого навчання агентів MAMS для визначення категорії рухомих об'єктів

На етапі попередньої обробки дані були проаналізовані: розглянутий розподіл даних; визначено, чи є в даних, які будуть проаналізовані, втрачені дані; визначено, у якій формі дані представлені. Необхідно перетворити дані в єдину форму для можливості порівняння. У нашому випадку було сформовано набір даних підмережі для додатків розподілених агентів $A^{s}_{m(i)}$. Специфічний трафік даних за категоріями оцінювали за допомогою функції *df.head()*. Різні спеціальні символи, які потрібно було видалити з *DataFrame*, були нормалізовані за допомогою *pymorphy2*.

Стовпчик *DataFrame* містить текстові дані з особливостями H_{RoA}. Вони повинні бути замінені числовими даними, узгоджуючи назву кожної категорії з її унікальним номером. Через велику кількість записів їх обробка потребує значного часу, тому для пришвидшення роботи в майбутньому рекомендується періодично зберігати зміни у *DataFrame*, наприклад, у форматі pickle. Дані у *DataFrame* читаються швидко і зручно в будь-який час. Отже, перед початком навчання залишається перетворити всі описи функцій агента A^{PL}_{H} в порівнянну форму і розбити дані. Настійно рекомендується змішати рядки всього *DataFrame* так, щоб всі категорії ролей агента потрапили до наборів даних про навчання та перевірку.

Набори навчальних та тестових даних будуть містити масив чисел із зазначенням описів функцій (*payP1, payP2*) агента A^{PL}_{H} та адрес підмережі (*payP3*) на який посилається агент $A_{NC(SNA)}$. Відповідно, дані для навчання будуть записуватися у змінні *payP1_train, payP2_train, payP3_train*, а дані для тестування алгоритму навчання будуть записуватися у змінні *payP1_test, payP2_test, payP13_test*. Цей етап включає вхідний масив з описом рядків функцій агента, масив з числовим позначенням міток категорії агента $A^{s}_{m(i)}$ та змінною, необхідною для зміни обсягу даних для тесту та перевірки.

У проведеному експериментальному дослідженні було використано 90 % даних для тренінгу та 10 % для перевірки результату. Для різних порцій був реалізований диспетчер мутацій поведінки агентів. Кількість категорій поведінки агента в словнику, який був використаний у дослідженні, становить 8, а кількість підмереж – до 256. Для вирішення проблеми категоризації було запропоновано використовувати у логіці агента модель Кераса, реалізована у направленому ациклічному графі (англ. Directed acyclic graph або DAG) шарів для запропонованої ідентифікації поведінки агентів MAMS на основі адрес підмережі (netSegPos) та категорій агентів (AgentCat) (рис. 7). Для визначення положення рухомого агента можна було використовувати лише 1700 кадрів з корисним навантаженням, що становить приблизно 17 % всього набору даних у 10 тис. кадрів.

Використання диспетчера мутацій поведінки як частини MAMS значно скорочує кількість обчислень та прискорює процес навчання. Дані перехресної перевірки використовуються для того, щоб перевірити, чи є модель надмірною для перекриття усіх даних. Щоб знайти рішення проблеми категоризації, моделі довгострокової пам’яті (англ. Long Short-Term Memory або LSTM) були включені як шар DAG.

Згідно з отриманими даними, запропонована модель показала 98,7 % точності у класифікації (рис. 8).

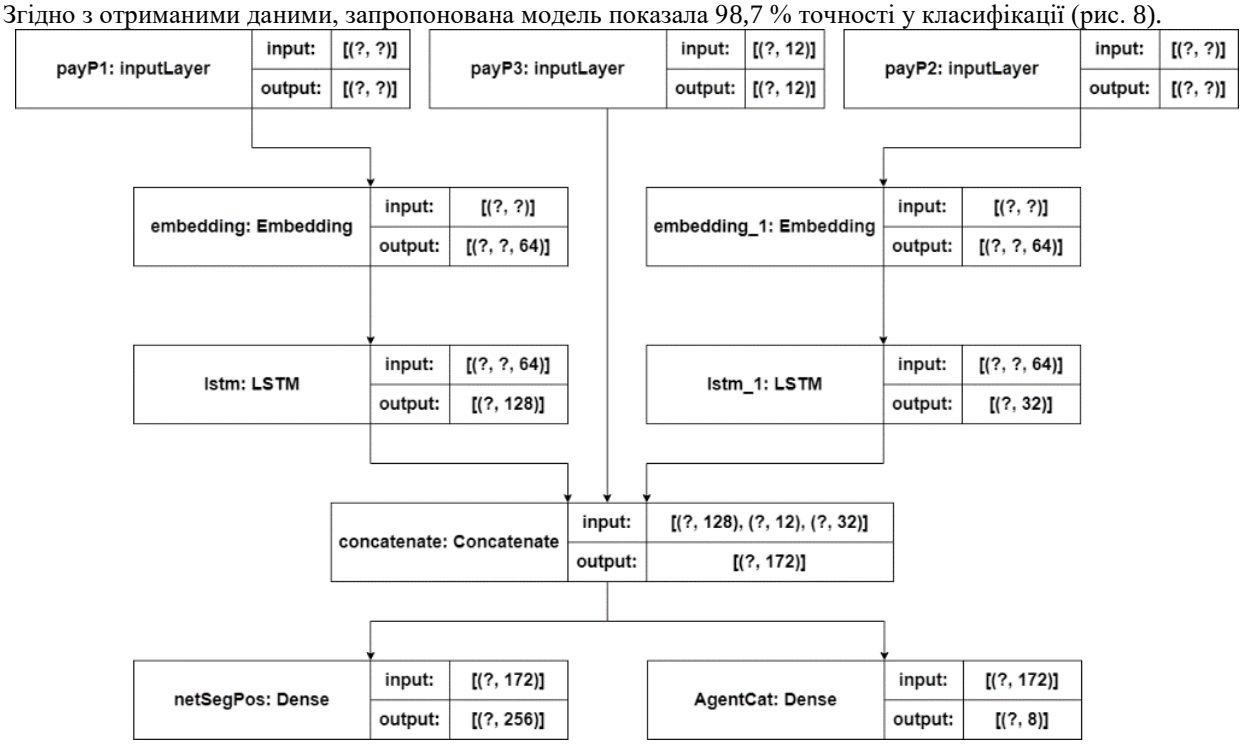


Рис. 7. Направлений ациклічний граф шарів для запропонованої ідентифікації поведінки агентів MAMS

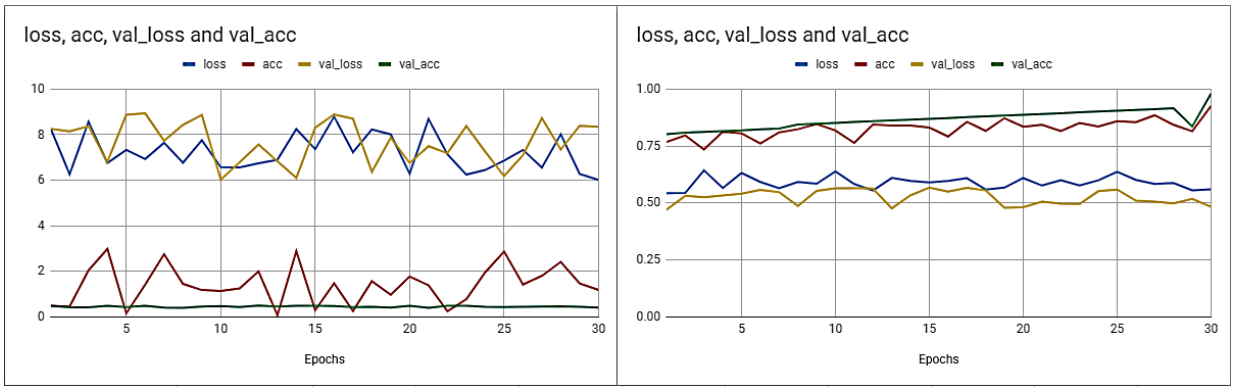


Рис. 8. Діаграма точності класифікаційних моделей агента

Таким чином, отримана модель була навчена шляхом запису історії навчання у сховище із заздалегідь заданим розміром партії. Період навчання становив 32 та 30 епох. Після навчання моделі її точність була підтверджена.

Висновки

У процесі дослідження обґрунтовано доцільність використання комплексної технології позиціонування на основі IEEE 802.11 (Wi-Fi) та мультиагентного підходу в єдності компонентів – позиціонування та ідентифікації виконуваних завдань.

З'ясовано місце запропонованого методу та моделі радіочастотного поширення, заснованого на мультиагентному підході, у системі задач навігації у просторі – для вирішення зазначених задач у приміщеннях, де сигнал від супутникових систем навігації надто слабкий. У такому випадку маршрутизатор, хост-сніффер та смартфон бо інші гаджети, якими оснащені рухомі об'єкти, можуть знаходитись у різних сегментах мережі. Це надає можливість відслідковувати будь-який пристрій, який має доступ до Інтернет, через Wi-Fi або Ethernet, як мобільний пристрій. Крім того, при такому підході, можливо зменшити кількість обчислень у моделі.

Розроблений алгоритм фіксації розташування рухомих об'єктів, підключених до бездротової мережі, шляхом їх ідентифікації за допомогою мультиагентного підходу та нейронної мережі. Розроблено програмне забезпечення (Sniffing Software), яке реалізує запропонований метод.

Для моніторингу об'єктів бездротової корпоративної мережі використовується мультиагентний підхід з урахуванням багатостороннього характеру радіоканалу при обчисленні характеристик сигналу під час прямого зв'язку рухомих об'єктів та зв'язку через точки доступу.

Однак, у 10 % випадків мобільний об'єкт буде незахищеним в корпоративній мережі. Тому, для рухомих об'єктів, пов'язаних з військовими проєктами, та для таких, що потребують підвищеного рівня інформаційної безпеки, у процесі визначення позиціонування рухомих об'єктів доцільно використовувати

методи, що базуються не тільки на радіохвилях, а також на аномалії магнітного поля Землі, на комбінаторній квантовій навігації, вібраційних процесах у мікрогіроскопах й т. і. [15, 16].

Дана робота є основою для проведення подальших теоретичних і практичних досліджень у напрямі використання зазначених технологій у різних умовах оточуючого середовища рухомих об'єктів для забезпечення їх безпечної навігації та визначення їх місцеположення з достатньою точністю.

Література

1. Дардари Д. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов / Д. Дардари, М. Луисе, Э. Фаллетти. – Москва : Техносфера, 2012. – 528 с.

2. Ченлян І. Аналіз результатів досліджень реальної пропускної здатності безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 / І. Ченлян, В. С. Лазебний // Проблеми інформатизації та управління. – 2019. – № 1 (61). – С. 30–39.

3. Santerre R. Single point positioning using GPS, GLONASS and BeiDou satellites / R. Santerre, L. Pan, C. Cai [et al.] // Positioning. – 2014. – Vol. 5. – P. 107–114. – DOI : 10.4236/pos.2014.54013

4. Пасічник В. В. Мобільні інформаційні технології навігації користувача в приміщеннях зі складною просторовою організацією / В. В. Пасічник, В. В. Савчук, О. І. Єгорова // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2016. – № 849. – С. 236–240.

5. Burlachenko I. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on multi-agent approach / I. Burlachenko, I. Zhuravska, M. Musiyenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, No. 9 (85). – P. 17–25. – DOI : 10.15587/1729-4061.2017.90863.

6. Pantiukhin A. R. System of determination of objects location inside of premises / A. R.Pantiukhin, A. S. Belyaev // International research journal. – 2017. – Vol. 10, No. 64. – P. 81–84. – DOI : 10.23670/IRJ.2017.64.012.

7. Bahl V. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system [Electronic resource] / V. Bahl // Proc. of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2016). – Access mode : https://www.youtube.com/watch?v=XI5-t5kKENk.

8. Dabove P. Positioning techniques with smartphone technology: performances and methodologies in outdoor and indoor scenarios [Electronic resource] / P. Dabove, V. Di Pietra, A. M. Lingua // Smartphones from an Applied Research Perspective. – 2017. – DOI : 10.5772/intechopen.69679.

9. Krzysztofik W. J. Radio network planning and propagation models for urban and indoor wireless communication networks [Electronic resource] / W. J. Krzysztofik // Antennas and Wave Propagation. – 2018. – DOI : 10.5772/intechopen.75384.

10. Youssef M. The Horus WLAN location determination system [Electronic resource] / M. Youssef, A. Agrawala // Proc. of the 3rd Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys), Seattle, Washington, USA. – 2005, June. – P. 205–218. – DOI : 10.1145/1067170.1067193.

11. Yu X. A method of fingerprint indoor localization based on received signal strength difference by using compressive sensing [Electronic resource] / X. Yu , X. Wang, J. Wu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking volume. – 2020. – No. 72. – DOI : 10.1186/s13638-020-01683-8.

12. Маркин Д. О. Модель системы определения местоположения мобильного устройства на основе метода статистических испытаний / Д. О. Маркин, С. М. Макеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 2. – С. 150–165.

13. Burlachenko I. Vulnerabilities analysis and defense based on MAS method in fast dynamic wireless networks [Electronic resource] / I. Burlachenko, I. Zhuravska, Ye. Davydenko, V. Savinov // Proc. of the Wireless Systems within the IEEE 4th Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IEEE IDAACS-SWS), Lviv, Ukraine, 2018. – P. 98–102. – DOI : 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525692.

14. Rida J. F. A. Improvement for performance radio frequency in wireless communication based on impulse signal / J. F. A. Rida // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020, May. – Vol. 18, No. (2). – P. 903–916. – DOI : 10.11591/ijeecs.v18.i2.pp. 903–916.

15. Canciani A. J. An analysis of the benefits and difficulties of aerial magnetic vector navigation / A. J. Canciani, C. J. Brennan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2020, April. – DOI : 10.1109/TAES.2020.2987475/

16. Tucker P. Four DARPA projects that could be bigger than the Internet. Defense One [Electronic resource] / P. Tucker. – Publ. May 20, 2014. – Access mode : https://www.defenseone.com/technology/2014/05/four-darpa-projects-could-be-bigger-internet/84856/.

References

1. Dardari D. Metody sputnikovogo i nazemnogo pozitsionirovaniya. Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki signalov / D. Dardari, M. Luise, E. Falletti. – Moskva : Tekhnosfera, 2012. – 528 s. [In Russian].

2. Chenlian I. Analiz rezultativ doslidzhen realnoi propusknoi zdatnosti bezprovodovykh merezh standartu IEEE 802.11 / I. Chenlian, V. S. Lazebnyi // Problemy informatyzatsii ta upravlinnia. – 2019. – № 1 (61). – S. 30–39 [In Ukranian].

3. Santerre R. Single point positioning using GPS, GLONASS and BeiDou satellites / R. Santerre, L. Pan, C. Cai [et al.] // Positioning. – 2014. – Vol. 5. – P. 107–114. – DOI: 10.4236/pos.2014.54013

4. Pasichnyk V. V. Mobilni informatsiini tekhnolohii navihatsii korystuvacha v prymishchenniakh zi skladnoiu prostorovoiu orhanizatsieiu / V. V. Pasichnyk, V. V. Savchuk, O. I. Yehorova // Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Radioelektronika ta telekomunikatsii. – 2016. – № 849. – S. 236–240 [In Ukrainian].

5. Burlachenko I. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on multi-agent approach / I. Burlachenko, I. Zhuravska, M. Musiyenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, No. 9 (85). – P. 17–25. – DOI: 10.15587/1729-4061.2017.90863.

6. Pantiukhin A. R. System of determination of objects location inside of premises / A. R.Pantiukhin, A. S. Belyaev // International research journal. – 2017. – Vol. 10, No. 64. – P. 81–84. – DOI: 10.23670/IRJ.2017.64.012.

7. Bahl V. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system [Electronic resource] / V. Bahl // Proc. of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2016). – Access mode : https://www.youtube.com/watch?v=XI5-t5kKENk.

8. Dabove P. Positioning techniques with smartphone technology: performances and methodologies in outdoor and indoor scenarios [Electronic resource] / P. Dabove, V. Di Pietra, A. M. Lingua // Smartphones from an Applied Research Perspective. – 2017. – DOI: 10.5772/intechopen.69679.

9. Krzysztofik W. J. Radio network planning and propagation models for urban and indoor wireless communication networks [Electronic resource] / W. J. Krzysztofik // Antennas and Wave Propagation. – 2018. – DOI: 10.5772/intechopen.75384.

10. Youssef M. The Horus WLAN location determination system [Electronic resource] / M. Youssef, A. Agrawala // Proc. of the 3rd Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys), Seattle, Washington, USA. – 2005, June. – P. 205–218. – DOI: 10.1145/1067170.1067193.

11. Yu X. A method of fingerprint indoor localization based on received signal strength difference by using compressive sensing [Electronic resource] / X. Yu , X. Wang, J. Wu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking volume. – 2020. – No. 72. DOI: 10.1186/s13638-020-01683-8.

12. Markin D. O. Model' sistemy opredeleniya mestopolozheniya mobil'nogo ustroistva na osnove metoda statisticheskikh ispytanii / D. O. Markin, S. M. Makeev// Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2016. – № 2. – S. 150–165 [In Russian].

13. Burlachenko I. Vulnerabilities analysis and defense based on MAS method in fast dynamic wireless networks [Electronic resource] / I. Burlachenko, I. Zhuravska, Ye. Davydenko, V. Savinov // Proc. of the Wireless Systems within the IEEE 4th Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IEEE IDAACS-SWS), Lviv, Ukraine, 2018. – P. 98–102. – DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525692.

14. Rida J. F. A. Improvement for performance radio frequency in wireless communication based on impulse signal / J. F. A. Rida // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020, May. – Vol. 18, No. (2). – P. 903–916. – DOI: 10.11591/ijeecs.v18.i2.pp. 903–916.

15. Canciani A. J. An analysis of the benefits and difficulties of aerial magnetic vector navigation / A. J. Canciani, C. J. Brennan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2020, April. – DOI: 10.1109/TAES.2020.2987475/

16. Tucker P. Four DARPA projects that could be bigger than the Internet. Defense One [Electronic resource] / P. Tucker. – Publ. May 20, 2014. – Access mode : https://www.defenseone.com/technology/2014/05/four-darpa-projects-could-be-bigger-internet/84856/.

Надійшла / Paper received : 19.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-81-88
УДК 004.773.2

Р. КАМІНСЬКИЙ, Н. ШАХОВСЬКА
Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ОПЕРАТОРА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В СТРЕСОВИХ СИТУАЦІЯХ

Приведена математична модель керованого людиною-оператором технологічного процесу з точки зору математичної теорії систем. Для моделювання використано апарат теорії множин. Модель враховує вплив людського фактору на якість керування технологічним процесом. Розглянуто поняття стресостійкості людини-оператора. Вводиться показник стресостійкості та наведена йог геометрична інтерпретація. Представлена модель виходу людини-оператора з стресового стану, яка враховує його індивідуальність.

Ключові слова: *людина-оператор, управління технологічним процесом, стрес оператора, крива навчання.*

R. KAMINSKYY, N. SHAKHOVSKA
Lviv Polytechnic National University

SIMULATION OF TECHNOLOGICAL OPERATION OPERATOR BEHAVIOR IN STRESS SITUATIONS

The mathematical model of the human-operator of technological process from the point of view of the mathematical theory of systems is developed. The apparatus of set theory was used for modelling. The model takes into account the influence of the human factor on the quality of process control. The concept of stress-resistance of the human operator is considered. The stress resistance index is introduced and the geometric interpretation is given by the yogi. The model of exit of the person-operator from a stressful condition which considers its individuality is resulted. The authors of this study proposed an approach to establish the value of the stress indicator. The basis of this indicator are the following four general characteristics, namely: experience and level of qualification of the human operator, the working environment and the amount of information about changes in the parameters controlled by the operator, the technological process. The presented models of human-machine interface, indicator of human operator stress and operator exit from stress can be interpreted as an attempt to formalize the operator's activity in human-machine control systems of many types of technological processes. From a practical point of view, these three models are focused on the use of quantitative indicators and characteristics, not only of the human operator, but also to some extent relate to both the technological process and the environment. The proposed indicator of human resilience to the stress, already using the appropriate scale of expert evaluation of its four elements, provides an opportunity to select the best from a group of candidates for the position of operator. This indicator, given the quantitative values of its elements, represents the relationship between the professional level and experience of the operator, the working environment and the amount of information provided. The model of the dynamics of the operator's exit from the stress state follows from the results of the analysis of the stress resistance indicator. Analysis of numerous data on human stress shows that the way out of stress is not instantaneous, but lasts for some time. In addition, the dynamics of the restoration of a person's functional state to normal is usually nonlinear and monotonous, and there may be a final nervous and mental stress, which accelerates his fatigue.

Keywords: *human operator, technological process management, operator stress, learning curve.*

Вступ

Одним з найбільш поширених людино-машинних інтерфейсів автоматизованих систем управління, інформаційно-пошукових систем та систем обробки інформації є ланка «людина-комп'ютер», яка практично забезпечує, відповідно узгоджене подання інформації користувачам. Людино-машинний інтерфейс фактично несе усю відповідальність за надану інформацію, а тому повинен бути надійним, точним та оперативним. В системному аспекті пара «людина – комп'ютер» є системою, утвореною поєднанням підсистем специфічних психофізичних особливостей і функціональних станів людини, пов'язаних з обробкою різноманітної інформації, та підсистеми технічних можливостей сучасної обчислювальної техніки. Роль техніки полягає в надзвичайно високій оперативності пошуку, спеціальної попередньої та різноманітної основної обробки необхідної інформації, а також її збереження, передачі, перетворення та представлення в різних формах.

Як правило, різноманітні робочі ситуації в діяльності людини, зокрема людини-оператора технологічних процесів створюють передумови для порушення режимів людино-машинних систем, появи помилкових дій, загрози виникнення аварійних ситуацій. Дослідженню таких ситуацій з метою моделювання поведінки людини присвячене дослідження [1]. Проаналізовано вплив стресових ситуацій на організм і поведінку людини під час управління технологічними процесами [2]. В [3] представлені матеріали експериментально-теоретичного дослідження інформаційного стресу людини-оператора, як одного з видів професійного стресу. Сучасним методам і засобам для визначення і діагностування емоційного стресу присвячена робота [4].

Моделювання динаміки людини-оператора відіграє важливу роль в керуванні технологічним процесом і є відображене в [5]. Дослідження надійності людини-оператора розглянуто в [6]. Важливе значення для допуску людини до керування технологічним процесом має її підготовка в першу чергу в сенсі стресостійкості, і саме цьому плані, інтерес представляє дослідження, приведене в [7]. Визначальну роль в моделюванні поведінки людини відіграє математичний апарат побудови моделі людино-машинного інтерфейсу як цілісної інтелектуальної системи керування технологічним процесом. Найбільш загальним системним підходом для побудови моделі людино-машинного інтерфейсу є робота [8]. Врахування в моделях поведінки функціонального стану оператора має велике значення не лише при управлінні мирним

технологічним процесом, але і для керування військовою технікою зокрема безпілотними літальними апаратами [9]. Ефективна робота людино-машинного інтерфейсу в середовищі розглянута в [10].

Важливе місце в дослідженні операторської діяльності мають ситуації, пов'язані зі стресом. Стрес на робочому місці став предметом підвищеної уваги дослідників в різних країнах. Динаміка поширення докладно викладена у звіті Міжнародного Офісу Праці [11].

Вплив відволікаючих увагу ситуацій, як приведено в [12], призводить до зниження ефективності оператора, а це вказує на те що в моделях оператора не можна вважати її параметри постійними. Зв'язок між психологічними та біологічними аспектами розглянуто в [13]. Індивідуальні відмінності щодо порогової величини та тривалості як внутрішніх так і зовнішніх подразників щодо стресу, приведені в [14]. Автори [15] представляють людино-машинні системи, в яких людський фактор відіграє важливу роль, а тому невдача людини може загрожувати небезпекою.

Моделювання виходу людини зі стресової ситуації розглядається багатьма дослідниками. Крива виходу зі стресового стану людини оператора досить добре, з точки зору природи цього процесу може бути описана кривою навчання, приведеною в [16]. Крива навчання є практично універсальною кривою і широко використовується в різних галузях виробництва [17–19], економічних показників [20] та стосовно зниження собівартості виробництва [21].

Основними несприятливими факторами для діяльності оператора є екстремальні ситуації, стрес, порушення біоритмів, сну та неврози, які фактично виступають як наслідок попередніх, і які сучасна наука розглядає як пограничний стан між здоров'ям і психічним захворюванням, пов'язаний з функціональними порушеннями в організмі. Різні обставини заставляють людину швидко і повноцінно адаптуватися і зберігати високу працездатність незалежно від змін оточуючого середовища.

Однією з важливих задач проблеми відновлення функціонального стану людини-оператора, тобто виходу з стресового стану, є дослідження процесів адаптації такої категорії працівників як оператори. Діяльність цих працівників в умовах росту технічного прогресу набуває все більш складного характеру, стає більш відповідальною і супроводжується значним нервово-психічним напруженням когнітивного ресурсу, творчих сил та здібностей.

Метою даного дослідження є розробка математичної моделі виходу людини-оператора з стресового стану, яка відображає загальний зміст його професійної діяльності в людино-машинному інтерфейсі керування технологічним процесом.

Моделювання керованого оператором технологічного процесу

Підсистема психофізичних функціональних особливостей, тобто людина-оператор, в більшості людино-машинних інтерфейсів є висококваліфікованим фахівцем, добре обізнаним з класом розв'язуваних задач, методами їх розв'язку та підходами і принципами інтерпретації отриманих результатів. Проте, людині є властиві певні особливості, об'єктивні і суб'єктивні, пов'язані з центральною нервовою системою, психікою та фізіологією цілого організму, які необхідно враховувати при організації її діяльності в ланці «людина-комп'ютер» у складі типових чи спеціалізованих складних та багатофункціональних систем. До об'єктивних особливостей відносять характеристики психофізіологічного стану людини та психофізичні параметри органів взаємодії з оточуючим середовищем, які безпосередньо чи опосередковано приймають участь в роботі людини-оператора. Суб'єктивні особливості, які до певної міри визначаються функціональним станом організму, проявляються у взаємодії з середовищем, а саме у відношеннях до виконуваної роботи, в оцінці робочої ситуації та у виборі рішень які приймає оператор.

Операторську діяльність можна подати в такий спосіб.

Нехай, протягом часу $[0,T]$ людина оператор керує деяким технологічним процесом $Z(t)$. Керування людиною таким процесом включає найбільш типові аспекти і компоненти реальної операторської діяльності. Системи відображення інформації включають монітори, мнемосхемі, інформаційні табло. В процесі експлуатації технічних засобів даного технологічного процесу та з боку середовища в регулярні або випадкові моменти часу t_i такі, що $t_i \in T$ де $T = \left\{ t_i : t_i \in [0,T], \quad i = \overline{1,N} \right\}$, фіксується деякий характеристичний вектор контрольованих показників $Z(t)$ – цього технологічного процесу, тобто реальних значень контрольованих параметрів. Значення цих параметрів, отримувані різними вимірювальними і контролюючими засобами мають відповідати заданим нормам технологічного процесу. Інформація про стан керованої технології та оточуюче середовище надається оператору на екрані монітору, інформаційному табло тощо. За зміни цих параметрів, тобто відхиленні їх від норми, оператор аналізує ситуацію і приймає відповідне рішення. Вибір прийнятого оператором рішення здійснюється шляхом реалізації потрібних команд на полі пульта керування.

Таким чином, людина-оператор і технічні засоби відображення інформації та виконання команд утворюють керуючу ланку фактично будь-якого технологічного процесу. Вони є цілісною системою, яку називають людино-машинним інтерфейсом.

Будь-який технологічний процес функціонує в межах множини наперед заданих нормативних та інструктивних значень параметрів – G^*, які визначають оптимальну роботу керованої технології $Z(t)$. Проте, в реальних робочих ситуаціях технологічний процес характеризується множиною – G реальних

значень цих параметрів. Величини цих параметрів і визначають біжучий стан цієї технології.

В процесі роботи, в довільні моменти часу t_i оператор отримує інформацію про хід технологічного процесу $Z(t)$ у формі відображень цих параметрів на інформаційному полі пульта керування.

Одномоментне відображення змін інформаційного поля можна подати як зображення-кадр x_i, яке відображає з моменту t_i всю інформацію про стан контрольованого оператором процесу $Z(t_i)$. Кожен такий кадр x_i є елементом множини $x_i \in X$, де $X = \left\{ x_i : x_i = x(t_i),\ t_i \in T,\ i = \overline{1, N} \right\}$, де N – кількість змін параметрів, тобто кадрів.

Тут, множина X фактично є множиною всіх одномоментних робочих ситуацій, в яких оператор приймав рішення – компенсувати відхилення значень параметрів від їх нормативних значень. Практично вона зберігає інформацію про перебіг технологічного процесу, виражену значеннями контрольованих параметрів.

Таким чином, сформовані на основі вектора значень реальних параметрів $\mathbf{g}_i = \langle g_i, \ldots, g_r \rangle$, $\mathbf{g}_i \in G$ зображення-кадри x_i даного технологічного процесу відбивають стан $Z(t_i)$ в моменти t_i, де $r = 1, 2, \ldots$ – кількість змінених параметрів.

При виявленні зміни в реальних параметрах $\mathbf{g}_i$, оператор, аналізує та порівнює реальні значення зі значеннями нормативних параметрів $\mathbf{g}_i^* \in G^*$. Для компенсації присутніх змін – існуючих відхилень в значеннях реальних параметрів, оператор конструює або вибирає з множини відомих альтернатив відповідне рішення.

Висококваліфікований досвідчений оператор використовує для порівняння та аналізу сформоване в його пам'яті зображення $x_i^* \in X^*$, яке відповідає встановленим нормативам. Іншими словами, аналізуючи зображення x_i і x_i^* оператор ідентифікує біжучу ситуацію, вибирає або конструює та приймає відповідне рішення $y_j \in Y$, де $Y = \left\{ y_j :\ y_j = y(t_j),\ j = \overline{1, N},\ t_j = t_i + \tau,\ t_i, t_j, \tau \in [0, T] \right\}$, тут τ – час вироблення рішення y_j.

Прийняте рішення y_j оператор реалізує набором команд $\mathbf{u}_h$, які утворюють вектор керування $\mathbf{u}_j = \langle u_1, \ldots, u_h \rangle$, $\mathbf{u}_j \in U$, де U – множина команд керування, а $h = 1, 2, \ldots$ – кількість команд в j-й ситуації.

Проте, якщо $x_i \neq x_i^*$, тобто для кадру x_i в множині X^* немає відповідного рішення і, крім того, присутній дефіцит часу, для оператора це може дати різке і значне за величиною нервово-психічне напруження – його перехід в стресовий стан.

Постійне нервове і розумове напруження, почуття відповідальності та обов'язку, довготривала монотонна робота природно створюють суттєве психофізичне навантаження на оператора. При цьому сповільнюються когнітивні та моторні функції, погіршується зоровий пошук, знижується оперативність та безпомилковість дій, виникає значне нервово-психічне перенапруження. Незважаючи на великі резервні та адаптаційні можливості людини, такий стан негативно відбивається на якості роботи людини-оператора.

Тому, ефективність роботи оператора необхідно зв'язувати з конкретними його функціональними (робочими) станами c_k. Множину цих станів можна подати так:

$$C = \left\{ c_k :\ c_k = c(\delta t_k),\ \delta t_k = t_{k+1} - t_k;\ \ t_k, t_{k+1} \in [0, T] \right\}.$$

На практиці цю множину розглядають як дискретну, проте встановити чітку межу між станами c_k і c_j є неможливо, оскільки чіткий перехід оператора із стану в стан практично неможливо визначити.

Загальну модель вимоги до оператора і фактично його діяльності в системі управління технологією $Z(t)$ можна сформулювати в такий спосіб: виявити на інформаційному полі пульта управління технологічним процесом $Z(t)$, представлені в моменти t_i зображенням-кадри $x_i \in X$ і компенсувати існуючі відхилення значень біжучих параметрів $\mathbf{g}_i$ від режимно заданих $\mathbf{g}_i^*$, шляхом вибору відповідного, вектора команд $\mathbf{u}_h$, реалізація якого поверне технологію $Z(t)$ в заданий режим роботи. Причому вибір, прийняття і реалізація рішення в даній ситуації повинні мати максимальну вірогідність $p \to 1$ при мінімальних витратах часу $\tau \to 0$, тобто

$$X\left(\mathbf{g}_i-\mathbf{g}_i^*\right)\xrightarrow[\tau\to 0]{p\to 1} optU\left(x\left(t_i\right), c\left(t_j-t_i\right), y\left(t_j\right)\right),$$

де x_i – біжучий кадр інформаційного поля, $c\left(t_j-t_i\right)=c(\tau)$ – час вибору рішення і команд, $y\left(t_j\right)$ – прийняте рішення.

Даний вираз відображає головну вимогу до інтелектуальної діяльності оператора, а саме, оперативно оптимізувати режим керованого ним процесу $Z(t)$. Сучасні виробництва, установи та окремі підприємства значною мірою використовують у своїй діяльності та в управлінні своїми технологічними процесами операторський персонал – людино-машинні інтерфейси. Керування такими технологічними процесами, з точки зору людино-машинного інтерфейсу як «цілісної системи керування» можна описати, використовуючи загальну теорію систем [8].

Отже, людино-машинний інтерфейс, як систему S, можна представити відношенням $S=X\times Y$, а враховуючи його існування на множині моментів часу T, в які проводять спостереження, та зміни функціонального стану C людини-оператора можемо представити його як кортеж: $S=\left\langle X, Y, C, \bar{\rho}, \bar{\phi}, T\right\rangle$. Його елементи відображають усі основні компоненти технологічного процесу. До них належать.

Множина входів $X=\left\{x_i : x_i=x\left(t_i\right),\ i=1, 2, \ldots,\ t_i\in T\right\}$ є множиною вхідних зображень-кадрів, що відображають реальний стан технологічного процесу, наданих на моніторі для опрацювання;

Множина виходів $Y=\left\{y_j : y_j=y\left(t_j\right),\ j=1, 2, \ldots,\ t_j\in T\right\}$ є множиною прийнятих людиною-оператором рішень, які компенсують зміни значень параметрів і забезпечують нормальний перебіг технологічного процесу;

Множина станів $C=\left\{c_k : c_k=c\left(t_k\right),\ k=1, 2, \ldots, t_k\in T\right\}$ є множиною функціональних станів людини-оператора протягом керування даним технологічним процесом.

Функція переходів $\bar{\varphi}=\left\{C_t\times X_t\to C_{t'},\ t, t'\in T,\ t'>t,\ t'-t=\Delta t'\to 0\right\}$, яка відображає поведінку такої системи і визначається зміною функціонального стану під впливом вхідної інформації, тобто якщо в момент часу t оператор знаходився в стані C_t і в цей момент подане зображення кадру $x_i(t)\equiv X_t$ зі зміною параметрів, для яких не існує в пам'яті оператора відповідного рішення. В такій ситуації людина починає оперативно шукати вихід з ситуації, в результаті чого з'являється нервове перенапруження і в момент t' вона вже знаходиться в деякому стані $C_{t'}$. Час переходу зі стану в стан є дуже коротким. Варто зазначити, що в такому поданні зміна стану може відбутися і з технічних причин і від зовнішнього середовища. Проте, припускається, що протягом керування таких змін не відбувається, а тому зміна станів стосується лише оператора.

Функція результату $\bar{\rho}=\left\{\rho_t : \rho_t=\rho\left(t''\right),\ C_t\times X_t\to Y_{t''},\ t, t', t''\in T,\ t''>t'>t,\ t''-t=\tau\to 0\right\}$, яка для звичайних робочих ситуацій, в залежності від вхідної інформації X_t та стану C_t, в якому перебуває оператор, вказує на отримання результату від дій оператора.

Множина моментів часу $T=\left\{t_i : t_{i+1}>t_i,\ t_{i+1}-t_i\neq 0,\ i=1, 2, \ldots.\right\}$ має, для такої моделі, важливе значення, оскільки в ній містяться дані про моменти часу, в які відбуваються початки і закінчення усіх змін в системі.

Момент часу t'' означає момент реалізації, прийнятого оператором рішення, а точніше реалізації цього рішення сформованим набором команд.

Крім констатації факту, а саме, настання подій: експозиції зображень x_i, прийняття і реалізації рішення y_j, зміни функціонального стану c_k в моделюванні діяльності оператора в сенсі розв'язування інтелектуальних задач (компенсації відхилень параметрів) важливу роль відіграє інтервал часу тривання самої події. Саме тривалість τ, тобто час з моменту появи змін до моменту реалізації рішення свідчить про вплив ситуації на людину-оператора.

Більш докладно, поняття стану людино-машинного інтерфейсу формально можна подати як множину окремих підмножин:

$$C=\left\{C_k^q : \bigcup_{k=1}^{K} C_k^q=C,\ \ C_k^q\cap C_l^q=\varnothing,\ \ k=\overline{1, K},\ q=1, 2, 3\right\}.$$

Стресостійкість людини-оператора

В певному сенсі, можна припустити, що в момент виявлення змін в параметрах технологічного процесу оператор відчуває певний дискомфорт, оскільки має оперативно проаналізувати ситуацію, вибрати та прийняти рішення. За одних умов такий дискомфорт може бути звичайною робочою ситуацією, а за інших – перевести оператора в стресовий стан.

Стресовий стан є найбільш небезпечним, в професійному аспекті, функціональним станом для

людини-оператора. В цьому стані суттєво погіршуються не лише психофізіологічні показники, але і професійні, функціональні навики можуть стати неадекватними в даній ситуації. При розгляді індивідуальної надійності операторського персоналу найбільш ефективним показником є стійкість перед екстремальними – стресовими ситуаціями.

Переважно стресом називають будь-який зовнішній вплив на організм, який вимагає від нього адекватної реакції шляхом мобілізації тих чи інших захисних сил. Виділяють три фази стресу.

Перша фаза полягає в тому, що організм мобілізує захисні сили і подає в потрібний момент достатньо енергії для адекватної реакції.

У другій фазі організм реалізує свої можливості. Проте, такий стан не може бути тривалим оскільки він швидко виснажує резерви організму, роззброює його, а це веде до ламання механізмів адаптації.

Третьою фазою є *постстрес*, який характеризується певного типу полегшенням і переважно незначною тривалістю, хоча в багатьох випадках ця фаза є досить тривалою – дні, тижні і навіть місяці.

В реальних технологічних процесах людино-машинний інтерфейс керування є найбільш відповідальною і разом з тим нестійкою ланкою.

Робота оператора вимагає постійної концентрації уваги, значного нервового напруження, мобілізації когнітивних ресурсів. Важливим моментом є те, що керування і контроль технологічного процесу є вельми монотонним, що у свою чергу спричинює додаткове підсилення стресового стану як неочікуваність та неготовність до реакції на нештатні та аварійні ситуації.

В цьому плані, важливе значення має такий елемент операторської діяльності як стресостійкість.

Нажаль в доступних літературних джерелах авторами не виявлено методів кількісного обчислення такої характеристики як стресостійкість. Переважна більшість з них дають представлення про стрес, його вплив на організм та наслідки, а також на вихід з стресового стану.

В професійному плані, на операторські спеціальності здійснюється відбір кандидатів відповідними психологічними службами. В їхньому арсеналі є велика кількість різноманітних методів, методик, тестів та відповідних засобів для визначення стресостійкості операторського персоналу. Проте використання їх на робочих місцях є практично неможливим. Оскільки більшість з них є пов'язані з фізіологічними особливостями їх використання або вимагають відволікання від роботи на робочому місці.

Авторами даного дослідження запропонований підхід для встановлення величини *показника стресостійкості персоналу* h. Основою цього показника є такі чотири загальні характеристики, а саме: досвід та рівень кваліфікації людини-оператора, робочого середовища та обсягу інформації про зміни параметрів, керованого оператором, технологічного процесу. Такими характеристиками є: Q – рівень кваліфікації людини-оператора, D – досвід роботи керування аналогічними технологічними процесами, E – дискомфортність робочого середовища, W – обсяг інформації зі зміненими параметрами.

Зв'язок між цими характеристиками є такий:

$$h = \frac{Q \cdot D}{E \cdot W}.$$

Зміст цього показника полягає в тому, що добре підготовленого, тобто висококваліфікованого оператора (Q) з великим практичним досвідом (D) досить важко «застати зненацька». Такий оператор дуже швидко орієнтується в можливих робочих ситуаціях навіть тоді, коли існує значний дискомфорт робочого середовища (E), а обсяг інформації про зміну параметрів (W) є досить великим.

Важливим моментом, щодо використання цього показника є те, що значення усіх чотирьох величин можуть бути визначені за шкалою, наприклад, експертних оцінок. Очевидно, вони також можуть бути виміряні як експертні оцінки за бальними шкалами. Хоча, такі оцінки є дуже загальними, проте в системах профвідбору, навчання та атестації операторського персоналу вони є цілком достатні для ідентифікації операторів та кластеризації їх за рівнем підготовки.

Іншими словами, приступаючи до роботи, кваліфікований оператор з достатнім досвідом має не дискомфортне робоче середовище, а інформаційний потік відповідає заданому, тобто обсяг наданої йому інформації на полі уваги є для нього мінімальним (цілком звичним), оскільки в керованій технології відсутні зміни її параметрів. Отже, робоче місце – середовище та інформаційне забезпечення є в межах норми. Це означає, що оцінки характеристик E і W за прийнятою шкалою є мінімальними. Якщо оператор є і кваліфікованим і має великий досвід, тоді оцінки його характеристик Q і D будуть достатньо високими. В результаті, його показник стресостійкості h буде високим і тоді можна вважати, що $h = h_{max}$.

Модель виходу оператора із стресового стану

Вихід зі стресового стану завжди займає певний час. Модель динаміки виходу людини-оператора з стресового стану можна подати в такому аспекті.

Нехай, в момент t_i виникне нетипова нестандартна ситуація, яка визначена змінами в значеннях параметрів технологічного процесу, тоді стан оператора переходить в стресовий, а сам оператор намагатиметься швидко знайти відповідне рішення для виходу з даної ситуації. Графічно динаміку

входження і вихід з стресового стану людини-оператора зображено на рис. 1.

З моменту t_i величина показника стресостійкості h стрімко падає вниз до деякого максимального рівня нервово-психічного напруження. В момент t_i' оператор усвідомлює суть події і починає пошук рішення. З цього ж моменту і до моменту $t_j = t''$ оператор аналізує і реалізує вибране рішення. Після цього оператор, як правило, спочатку досить швидко, а далі сповільнюючись виходить із стресового стану. Можна також прийняти, що в момент $t_j = t''$ технологічний процес повернувся в нормативні параметри. Крім того, протягом інтервалу часу $t_j - t_i' = \tau$ оператор, дещо зменшує величину свого стресового стану, мобілізуючи свій когнітивний ресурс власне для аналізу вибраного рішення та створює відповідну послідовність команд.

В момент t_j оператор все ще перебуває в стресовому стані, але далі, аналізуючи наслідки від прийнятого рішення і потрохи заспокоюючись він повертається до свого нормального функціонального стану. Саме про це і вказує монотонне зростання кривої показника стресостійкості h.

Модель виходу оператора із стресового стану легко подати диференціальним рівнянням

$$\frac{dh}{dt} = k\left(h_{max} - h \right).$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Подане рівняння характеризує швидкість зростання показника стресостійкості h з моменту часу t_j, коли оператор прийняв і реалізував рішення. Наведене диференціальне рівняння є рівнянням з відокремлюваними змінними, тому його розв'язок можна легко знайти в загальному вигляді: $h_{\max} - h = Ce^{-kt}$.

Постійну C можна знайти з початкової умови: $h\left(t_j = 0\right) = V$. Отже, $C = h_{max} - V$. Тут момент $t_j = 0$ означає те, що відлік аргументу кривої виходу оператора з стресового стану стосується саме цього моменту.

Криву виходу оператора з стану стресу називають «кривою навчання», проте її застосування виявляється значно ширшим. Таким чином, ця крива в нашому випадку описується такою формулою.

$$h(t) = h_{max} - \left(h_{max} - V\right) \cdot e^{-kt}.$$

Швидкість кривої виходу із стресового стану $h(t)$ від значної, зразу після моменту t_j, поступово і нелінійно сповільнюється, наближаючись до свого максимального значення h_{max}. Параметр V означає той мінімальний рівень показника стресостійкості, за якого оператор ще в стані прийняти і реалізувати адекватне рішення (врятувати технологічний процес). Різниця $\left(h_{max} - V \right)$ характеризує потенціал стресостійкості людини-оператора. Якщо $V < h_{min}$ оператору необхідно припинити керування технологічним процесом. Параметр k, який у виразі рівняння визначається як коефіцієнт пропорційності, в останньому виразі має фізичний зміст, який означає індивідуальність оператора, а його математичний зміст – швидкість підйому кривої.

Обговорення

Представлені моделі людино-машинного інтерфейсу, показника стресостійкості людини-оператора та виходу оператора з стресового стану можна інтерпретувати як спробу формалізації операторської діяльності в людино-машинних системах керування багатьма видами технологічних процесів. З практичної точки зору, ці три моделі орієнтовані на використання кількісних показників і характеристик, не лише людини-оператора, але і до певної міри стосуються як самого технологічного процесу так середовища.

Запропонований показник стресостійкості людини-оператора, вже за умови використання відповідної шкали експертного оцінювання його чотирьох елементів, надає можливість відібрати з групи кандидатів-претендентів на місце оператора кращих. Даний показник, за умови кількісних значень його елементів, представляє зв'язок між професійним рівнем і досвідом оператора, робочим середовищем та обсягом наданої інформації.

Модель динаміки виходу оператора зі стресового стану випливає з результатів аналізу показника стресостійкості. Аналіз численних даних, щодо стресу людини, свідчить про те, що вихід з стресового стану не відбувається миттєво, а триває деякий час. Крім того, динаміка відновлення функціонального стану людини до нормального є, як правило, нелінійною і монотонною, причому може мати місце остаточне нервово-психічне напруження, яке пришвидшує його втому.

Приведені результати можуть бути використані в різних лабораторіях та установах для організації професійного відбору претендентів в штат операторського персоналу, їх навчання та перенавчання, а також

для атестації кваліфікаційного рівня. Очевидно, що в таких випадках має бути сформована експертна комісія та враховані характеристики конкретного технологічного процесу та вимоги до нього.

Література

1. Приснякова Л. До моделювання поведінки людини / Л. Приснякова, В. Присняков // Психологія і суспільство. – 2004. – № 3. – С. 91–98.

2. Мочурад Л.І. Моделювання стресової ситуації людини в автоматизованих системах управління технологічними процесами /Л.І. Мочурад, Н.І. Бойко, М.В. Яцків // Науковий вісник НЛТУ України. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 152–157.

3. Бодров В. А. Информационный стресс : учебное пособие для вузов / Бодров В.А. – М. : ПЕР СЭ, 2000. – 352 с.

4. Havlikova M., Jirgl M., Bradac Z. Human Reliability in Man-Machine Systems. Procedia Engineering 100. 2015. P. 1207–1214.

5. Jiacai Huang, YangQuan Chen, Haibin Li, Xinxin Shi.Fractional Order Modeling of Human Operator Behavior with Second Order Controlled Plant and Experiment Research[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(3): 271–280.

6. Marie Havlikova, Miroslav Jirglb, Zdenek Bradacc. Human Reliability in Man-Machine Systems / 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2014. Procedia Engineering Volume 100, 2015, Pages 1207-1214

7. Сучасні методи і засоби для визначення і діагностування емоційного стресу : монографія / за заг. ред. О.П. Мінцера. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 228 с.

8. M. D. Mesarovic and Yasuhiko Takahara. GENERAL SYSTEMS THEORY: MATHEMATICAL FOUNDATIONS. Mathematics in science and engineering Volume 113, ACADEMIC PRESS New York, San Francisco, London 1975 – 316 p.

9. Yurii Kryvenchuk, Ihor Helzynskyy, Tetiana Helzhynska, Nataliya Boyko, Roman Danel. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2488/paper26.pdf.

10. Kralikova R., Dzunova L., Pinosova M., Wessely E. & Koblasa F. (2019). Man-Machine-Environment System Analyses and Impact of Environment Factors to Productivity and Health of Employees, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0131-0138, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.

11. Workplace Stress: A collective challenge – Report, 04 April 2016, 978-92-2-130642-9[ISBN]. URL: https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_466547/lang--en/index.htm

12. A. Kopyt, K. Zużewicz, P. Bartuzi. Experimental identification of a mathematical model of human operator working under mental stress / Acta of Bioengineering and Biomechanics Original paper Vol. 19, No. 3, 2017. – P. 177–185.

13. D. Savic, G. Knezevic and G. Opacic. A mathematical model of stress reaction: Individual differences in threshold and duration. Psychobiology 2000, 28 (4), 581–592.

14. Филиппов М.М. Психофизиология функциональных состояний : учеб. пособие / Филлипов М.М. – Киев : МАУП, 2006. – 240 с.

15. Ложкин Г.В. Практическая психология в системах «человек – техника» / Ложкин Г.В., Повякель Н.И. – Киев : МАУП, 2003. – 296 с.

16. Mathematical modeling of learning. Peter F. W. PREECE The School of Education, University of Exeter, St. Luke 3, Exeter, EX 1 2L U, England // JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING VOL. 21, NO. 9, PP. 953-955 (1984).

17. Learning curve models and applications: Literature review and research directions Michel Jose Anzanello, Flavio Sanson Fogliatto. Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99 - 5 andar, Porto Alegre e CEP 90.035-190, Rio Grande do Sul, Brazil // International Journal of Industrial Ergonomics 41 (2011) 573–583.

18. Levente Malyusz and Attila Pem / Predicting future performance by learning curves. Procedia - Social and Behavioral Sciences 119 (2014) 368–376.

19. An almost learning curve model for manual assembly performance improvement. Vytautas Kleizaa, Justinas Tilindisb. Published online: October 10, 2016. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Vol. 21, No. 6, 839–850.

20. LEARNING CURVES: AN ALTERNATIVE ANALYSIS THESIS Sharif F. Harris, URL: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1055207.pdf

21. Learning Rate Sensitivity Model Nichols F. Brown System of Systems Engineering Office Systems Engineering Division Timothy P. Anderson Integrated Cost and Schedule Analysis Department Systems Engineering Division. Presented at the 2018 ICEAA Professional Development & Training Workshop. URL: www.iceaaonline.com

References

1. Prysnyakova L., Prysnyakov V. To model human behavior. Psychology and society. 2004. № 3. P. 91–98.

2. Mochurad L.I., Boyko N.I., Yatskiv M.V. Modeling of human stress situation in automated process control systems. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine, 2020, vol. 30, № 1. P. 152–157.

3. Bodrov V. A. Information stress: textbook for universities. M.: PER SE, 2000. 352 p.

4. Havlikova M., Jirgl M., Bradac Z. Human Reliability in Man-Machine Systems. Procedia Engineering 100 (2015). P. 1207–1214.

5. Jiacai Huang, YangQuan Chen, Haibin Li, Xinxin Shi.Fractional Order Modeling of Human Operator Behavior with Second Order Controlled Plant and Experiment Research[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(3): 271-280.

6. Marie Havlikova, Miroslav Jirglb, Zdenek Bradacc. Human Reliability in Man-Machine Systems / 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2014/ Procedia Engineering Volume 100, 2015, Pages 1207-1214

7. Modern methods and tools for determining and diagnosing emotional stress: a monograph / for general. ed. O.P. Minzer. - Vinnytsia: VNTU, 2010. 228 p.

8. M. D. Mesarovic and Yasuhiko Takahara. GENERAL SYSTEMS THEORY: MATHEMATICAL FOUNDATIONS. Mathematics in science and engineering Volume 113, ACADEMIC PRESS New York, San Francisco, London 1975. 316 p.

9. Yurii Kryvenchuk, Ihor Helzynskyy, Tetiana Helzhynska, Nataliya Boyko, Roman Danel. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2488/paper26.pdf.

10. Kralikova, R., Dzunova, L., Pinosova M., Wessely E. & Koblasa F. (2019). Man-Machine-Environment System Analyses and Impact of Environment Factors to Productivity and Health of Employees, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp. 0131-0138, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.

11. Workplace Stress: A collective challenge – Report, 04 April 2016, 978-92-2-130642-9[ISBN]. URL: https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_466547/lang--en/index.htm

12. A. Kopyt, K. Zużewicz, P. Bartuzi. Experimental identification of a mathematical model of human operator working under mental stress / Acta of Bioengineering and Biomechanics Original paper Vol. 19, No. 3, 2017. – P. 177–185.

13. D. Savic, G. Knezevic and G. Opacic. A mathematical model of stress reaction: Individual differences in threshold and duration / Psychobiology 2000, 28 (4), 581-592. 14. Filippov M.M. Psychophysiology of functional states: Textbook. Benefit. Kiev: MAUP, 2006. 240 p.

14. Lozhkin G.V., Povyakel N.I. Practical psychology in the systems "man - technology". Kiev: MAUP, 2003. 296 p.

15. Mathematical modeling of learning. Peter F. W. PREECE The School of Education, University of Exeter, St. Luke 3, Exeter, EX 1 2L U, England // JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING VOL. 21, NO. 9, PP. 953-955 (1984).

16. Learning curve models and applications: Literature review and research directions Michel Jose Anzanello, Flavio Sanson Fogliatto. Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99 - 5 andar, Porto Alegre e CEP 90.035-190, Rio Grande do Sul, Brazil // International Journal of Industrial Ergonomics 41 (2011) 573–583.

17. Levente Malyusz and Attila Pem / Predicting future performance by learning curves. Procedia - Social and Behavioral Sciences 119 (2014) 368–376.

18. An almost learning curve model for manual assembly performance improvement. Vytautas Kleizaa, Justinas Tilindisb. Published online: October 10, 2016. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Vol. 21, No. 6, 839–850.

19. LEARNING CURVES: AN ALTERNATIVE ANALYSIS THESIS Sharif F. Harris, URL: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1055207.pdf

20. Learning Rate Sensitivity Model Nichols F. Brown System of Systems Engineering Office Systems Engineering Division Timothy P. Anderson Integrated Cost and Schedule Analysis Department Systems Engineering Division. Presented at the 2018 ICEAA Professional Development & Training Workshop. URL: www.iceaaonline.com

Надійшла / Paper received : 13.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-89-94
УДК 004.056.5

С.М. ЛИСЕНКО, Т.М. КИСІЛЬ, Р.В. ЩУКА
Хмельницький національний університет

ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ТА ШПЗ В КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖАХ

В роботі представлено інтелектуальний агент виявлення кіберзагроз та ШПЗ в корпоративних мережах, який представляє програмну систему із можливістю виявлення відомих та невідомих кібератак, ШПЗ мережного та хостового типу, а також здатністю продукувати множину сценаріїв безпеки для забезпечення резильєнтності КС в умовах кіберзагроз. Резильєнтність мережі та хостів забезпечується їх динамічною адаптивною реконфігурацією та множиною заходів, що дозволяють функціонувати системам в умовах атак. Інтелектуальний агент виявлення кіберзагроз та ШПЗ BotGRABBER - це мультивекторна система захисту, оскільки вона поєднує аналіз як в мережі, так і в активності хостів. Комбінована інформація дозволяє не тільки виявляти кібератаки різного типу, але й автоматично застосовувати необхідний сценарій безпеки мережної реконфігурації та адаптації КС відповідно до типу виявленої кібератаки. Інтелектуальний агент забезпечує можливість виявлення відомих та невідомих кібератак, можливість виявлення ботнетів, які використовують методи ухилення від DNS (циклічне відображення IP-адреси, "домен flux", "швидкий flux" та DNS-тунелювання), здатність самостійно застосовувати сценарії безпеки для пом'якшення кібератак, забезпечення резильєнтності корпоративних мереж в умовах кібератак, забезпечення мультивекторного захисту корпоративних мереж.

Ключові слова: шкідливе програмне забезпечення, інтелектуальний агент, кіберзагроза, кібератака, комп'ютерна мережа, сценарій безпеки.

S. LYSENKO, T. KYSIL', R. SHCHUKA
Khmelnytskyi National University

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL AGENT FOR DETECTION OF CYBER THREATS AND MALWARE IN CORPORATE NETWORKS

The purpose of this paper is to develop an intellectual agent for detection of cyber threats and malware in corporate networks – BotGRABBER. It provides a novel botnet detection framework with the key features given below: ability to detect the most known botnets' cyberattacks; ability to detect the botnets that use the evasion techniques (cycling of IP mapping, "domain flux", "fast flux" and DNS-tunneling); ability to self-adaptive appliance of the security scenarios for the cyberattacks mitigation, performed by botnets; assuring the corporate area networks' resilience in the presence of botnets' cyberattacks; assurance of the multi vector protection for corporate area networks. The main components of the intellectual agent are:

1. Knowledge base. Knowledge base provides the information storage concerning to the cyberattacks performed by a botnet in the network and in the hosts. Here, each cyberattack is presented as the feature vector, which consists of functional botnets' features. To increase the efficiency of the botnet detection each stage of possible botnet's life cycle functioning (infection; initial registration or connection to C&C server; performance of the malicious activity; maintenance; its functioning termination) is presented by own feature vector.

2. Knowledge acquisition unit. Taking into account the increasing of the new ways to perform the cyberattacks proposed tool is provided by ability to update the knowledge about new botnets.

3. Network monitoring unit. This unit implements the network monitoring via gathering of the inbound and outbound network traffic. Collected information is converted into the feature vectors, and is sent to the SVM-based inference engine for further data processing.

4. Host monitoring unit. This unit implements the gathering the information about the hosts' network activity and reports of the hosts' antiviruses. It also converts the collected information into the feature vectors, and sends it to the SVM-based inference engine for further data processing.

5. SVM-based inference engine. This component provides an ability to classify the feature vectors obtained from the network. The main task of the SVM-based inference engine is to range obtained feature vector in a class, which will indicate whether it is cyberattacks, performed by botnet. If the attack is observed, the security scenario according to detected attack in order to mitigate it is to be applied.

6. Network reconfiguration unit. This unit applies produced by the SVM-based inference engine the security scenario for the CAN's infrastructure.

Keywords: malware, intellectual agent, cyberattacks, cyberthreats, computer network, security scenario.

Вступ

На сьогоднішній день з стрімким поширенням комп'ютерних систем та інформаційних технологій, а також їхньої інтеграції у глобальну мережу Internet, кібератаки та шкідливе програмне забезпечення (ШПЗ) є одним із основних видів кіберзлочинності. Збитки, заподіяні ними при інфікуванні хостів мережі, можуть бути від незначного збільшення вихідного трафіку до повного порушення працездатності мережі або втрати критично важливих даних. Причиною цього є те, що комп'ютерні системи не завжди характеризуються резильєнтністю – здатністю передбачати, протистояти, відновлюватись та пристосовуватися до атак. Відомі рішення цілісного підходу до забезпечення резильєнтного функціонування КС в умовах здійснення нових і невідомих атак [1, 2]. Тому актуальною задачею є розроблення нових підходів до виявлення нових виді кіберзагроз на основі інтелектуального аналізу даних.

Пов'язані роботи

В [3] запропоновано виявлення на основі аналізу властивості асимптотичного рівнорозподіленості (AEP) для програмного семантичного аналізу для вилучення семантично відповідних шляхів, забезпечуючи можливість семантично розуміти послідовності системних викликів. UNVEIL – інформаційна технологія, побудована на базі пісочниці для виявлення ШПЗ типу ransomware. За допомогою моделей поведінки можна виявити підозрілі дії файлової системи [4]. В [5] запропоновано метод статичного аналізу для автоматичного

виявлення поведінки динамічного завантаження коду. Евристики реалізовані для пошуку викликів методів, пов'язаних із відповідними методами. MALT – це інформаційна технологія відлагодження, яка використовує режим управління системою для прозорого аналізу шкідливих програм, і здатна аналізувати та виявляти руткіти на основі гіпервізора та ядра операційної системи (ОС) [6]. TriggerScope – інформаційна технологія, заснована на методах аналізу програм для виявлення зловмисної логіки програми, яка виконується або спрацьовує за наявності механізмів логічної бомби [7]. Targetdroid – інформаційна технологія, яка може виявити цільове ШПЗ та викликати зловмисну поведінку. Стохастична модель, що викликає поведінку, розроблена на основі ланцюгів Маркова для вираження потоку керування [8]. В [9] запропоновано інформаційну технологію аналізу ШПЗ, яка використовує методику перевірки моделі для виявлення поведінки на високому рівні, наприклад, поведінки потоку інформації. Формальна поведінка визначається як нескінченна підмножина послідовності викликів бібліотек, а набір моделей поведінки з семантичним розумінням виражається за допомогою формул лінійної часової логіки (FOLTL) першого порядку. AppContext [10] – інформаційна технологія аналізу ПЗ, яка диференціює шкідливі та доброякісні форми поведінки ПЗ. AppContext отримує контексти поведінки, залежної від безпеки, та проводить статичний аналіз для визначення поведінки, залежної від безпеки.

Архітектура інтелектуального агента виявлення кіберзагроз та шпз в корпоративних мережах

Інтелектуальний агент виявлення кіберзагроз та ШПЗ в корпоративних мережах, який має назву BotGRABBER, представляє програмну систему із можливістю виявлення відомих та невідомих кібератак, ШПЗ мережного та хостового типу, а також здатністю продукувати множину сценаріїв безпеки для забезпечення резильєнтності КС в умовах кіберзагроз. Резильєнтність мережі та хостів забезпечується їх динамічною адаптивною реконфігурацією та множиною заходів, що дозволяють фунціонувати системам в умовах атак. Інтелектуальний агент виявлення кіберзагроз та ШПЗ BotGRABBER – це мультивекторна система захисту, оскільки вона поєднує аналіз як в мережі, так і в активності хостів. Комбінована інформація дозволяє не тільки виявляти кібератаки різного типу, але й автоматично застосовувати необхідний сценарій безпеки мережної реконфігурації та адаптації КС відповідно до типу виявленої кібератаки.

Інтелектуальний агент забезпечує:

a. можливість виявлення відомих та невідомих кібератак;

b. можливість виявлення ботнетів, які використовують методи ухилення від DNS (циклічне відображення IP-адреси, “домен flux”, “швидкий flux” та DNS-тунелювання);

c. здатність самостійно застосовувати сценарії безпеки для пом'якшення кібератак;

d. забезпечення резильєнтності корпоративних мереж в умовах кібератак;

e. забезпечення мультивекторного захисту корпоративних мереж.

Компоненти архітектури інтелектуального агента представлено на рис. 1.

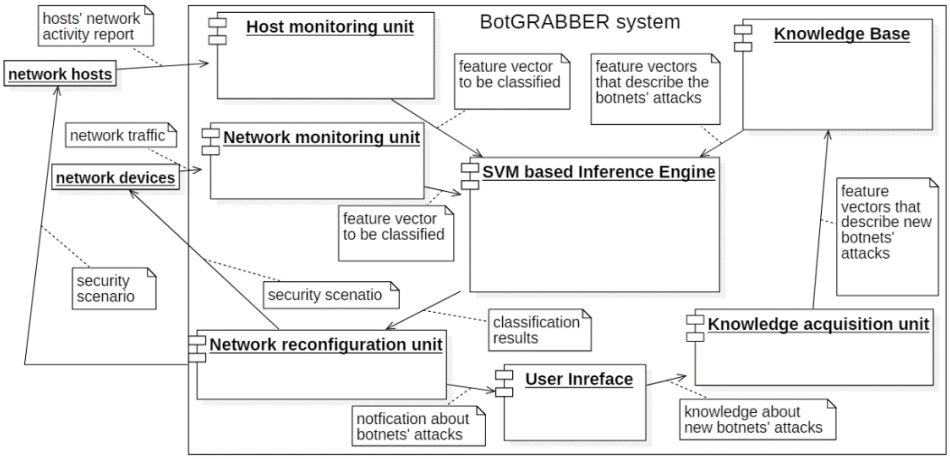


Рис. 1. Архітектура інтелектуального агента BotGRABBER

Модуль бази знань. База знань забезпечує зберігання інформації про кібератаки та шкідливе програмне забезпечення, які виконуються в мережі та на хостах. Тут кожна кібератака та ШПЗ представлені вектором ознак та дій, з яких вони складаються. Для підвищення достовірності виявлення загроз кожен етап функціонування можливого життєвого циклу атаки чи ШПЗ (зараження, початкова реєстрація або підключення до сервера C&C, виконання шкідливого функціонування, обслуговування, припинення його функціонування тощо) представлений за допомогою власного вектора ознак та дій. Перелік атак, які аналізуються системою BotGRABBER: DDoS; ping flooding; smurf attack; TCP SYN Flood; Fragmented UDP Flood; DNS Amplification; TCP Reset; ICMP Flood; RUDY; SIP INVITE Flood ; Encrypted SSL DDoS; ping sweep attack; SQL /PHP injection; Cross-Site Scripting (XSS); DNS spoofing; TCP scan/UDP scan; Phishing; Port Binding; Connect-Back; Connection Availability Abuse; Legitimate Platform Abuse; Protocol/Port Listening; Custom DNS Lookup Use; Port Reuse; Common Service Protocol/File Header Abuse.

Модуль оновлення знань. Враховуючи все більшу кількість нових способів виконання кібератак, пропонований інструмент має можливість оновити знання про нові атаки.

Модуль моніторингу мережі. Цей пристрій реалізує мережний моніторинг шляхом збору вхідної та вихідної мережі. Зібрана інформація перетворюється у функціональні вектори та надсилається до модуля висновку для подальшої обробки даних.

Модуль моніторингу хостів. Цей блок реалізує збір інформації про діяльність мережі хостів та звіти про антивіруси хостів. Він також перетворює зібрану інформацію у функціональні вектори та надсилає її до системи висновку на основі SVM для подальшої обробки даних.

Модуль здійснення висновку. Основне завдання двигуна висновку на основі SVM – присвоїти векторний елемент xi, отриманий з мережі, класу в, де $x_i \in X$, $a_t \in A$, $A = \{a_t\}_{k=1}^{N_A}$ N_A - це кількість класів, де кожному класу відповідає один заданий тип атак, виконуваних ботнетом. Двигун висновку на основі SVM робить висновок про наявність або відсутність кібератак та виявляє можливий тип атаки. Залежно від виявленого типу атаки a_t на сценарій безпеки s_q слід застосувати для відновлення мережі, $S = \{s_q\}_{q=1}^{N_S}$, де S - сукупність усіх сценаріїв безпеки, N_S – кількість захищених сценаріїв. Таким чином, функція f, вибираючи сценарій безпеки для відновлення мережі, визначається як: f: $d_u \times a_t \rightarrow s_m$, де $d_u \in D$, 1, $D = \{d_u\}_{u=1}^{N_D}$ де d_u - мережний компонент, атакований ботнетом , N_D – це кількість мережних компонентів.

Модуль відновлення. Якщо спостерігається атака, то слід застосувати сценарій безпеки, зпродукований модулем здійснення висновку, щоб пом'якшити наслідки атаки. Цей модуль застосовує сценарій безпеки. Метою сценарію безпеки є відновлення мережевої інфраструктури залежно від типу атаки.

Інтерфейсі вікна програмної реалізації інтелектуального агента виявлення кіберзагроз та шпз в корпоративних мережах представлено на рис. 2–5.

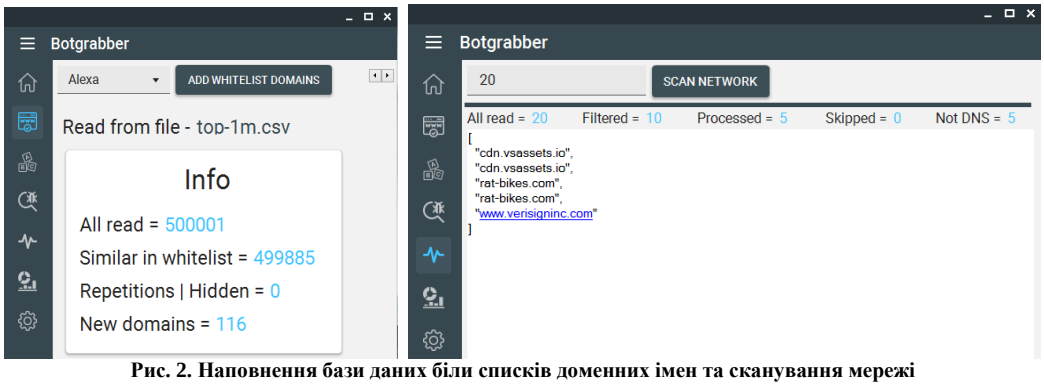


Рис. 2. Наповнення бази даних біли списків доменних імен та сканування мережі

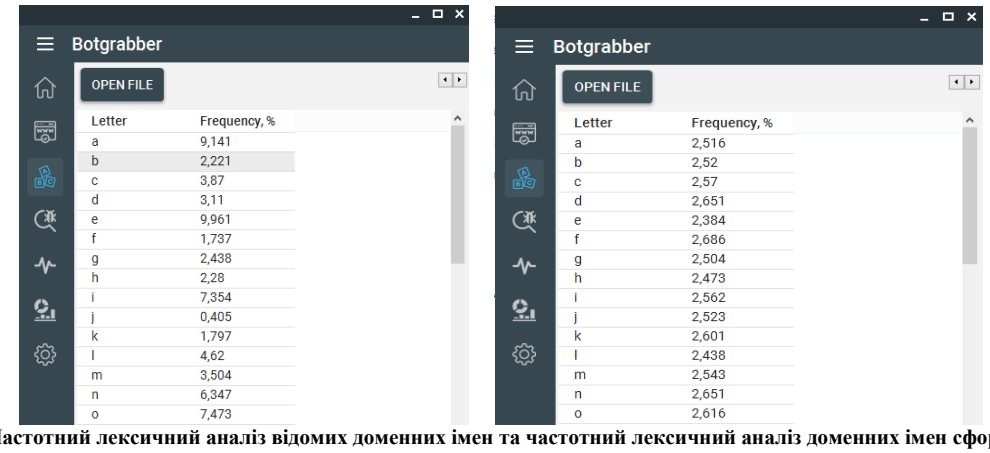


Рис. 3. Частотний лексичний аналіз відомих доменних імен та частотний лексичний аналіз доменних імен сформованих алгоритмічно

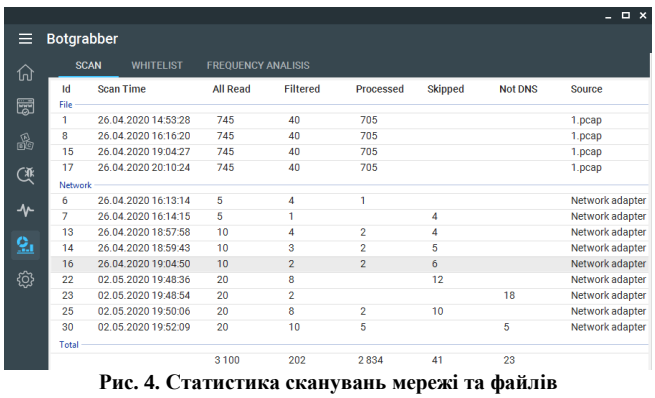


Рис. 4. Статистика сканувань мережі та файлів

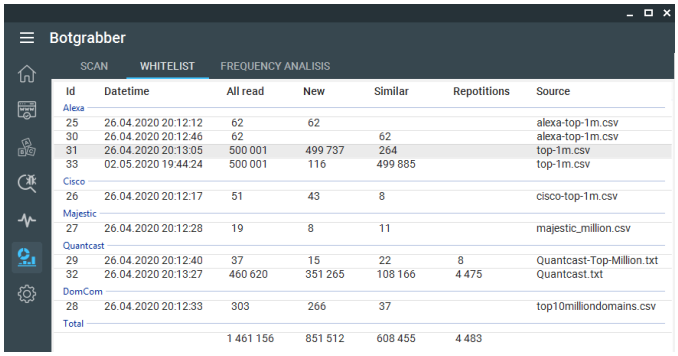


Рис. 5. Статистика наповнення бази даних білих списків доменних імен

Експерименти

Для того, щоб оцінити ефективність застосування інтелектуального агента BotGRABBER, як реалізації інформаційної технології забезпечення резильєнтності КС в умовах кіберзагроз були проведені дослідження з використанням реального мережного трафіку. Для цього було використано набір даних [11], який поєднує загальність, реалістичність та репрезентативність. Набір даних містить як шкідливі (наприклад, сліди Storm, Zeus Neris, Rbot, Virut, NSIS, Menti, Sogou, і Murlo), так і нешкідливі набори (ігрові пакети, HTTP tracc і P2P програми, такі як bittorrent). Крім того, він містить сформований реальний трафік, який імітує поведінку користувачів (наприклад, SSH, HTTP та SMTP). Набір даних поділяється на навчальні набори *T* та оцінювання (тест) E, які включають ботнетів, які виконують атаки. Набір даних включає 19755 зразків, 49,56% з яких шкідливі, а нагадування містить нормальні потоки. Тестовий набір даних включає 18917 зразків, 55,77% з яких представляють шкідливі потоки.

Для проведення експериментів, університетська локальна мережа з 50 хостів (з операційною системою Microsoft Windows), один виділений сервер (операційна система Linux OpenSusE з nginx HTTP-сервером) та мережеві пристрої (MikroTik CCR1009-8G-1S-1S + Були застосовані маршрутизатори ПК). Мережевий трафік захоплювався за допомогою утиліти tcpdump. Усі експерименти були організовані в режимі реального часу та реальних мереж і тривали від декількох секунд (наприклад, фішинг, скидання TCP, ін'єкція SQL / PHP, XSS) до однієї години (наприклад, DDoS, ping-flooding, RUDY, фрагментований UDP Flood, TCP SYN Flood тощо) залежно від типу атаки.

Для оцінювання загальної достовірність виявлення кібератак різного типу системою BotGRABBER було використано метрики, що використовуються для оцінювання якості класифікації в теорії машинного навчання [1]: чутливість, True Positive Rate (TPR) – відсоток зловмисних поведінок в КС, що класифіковані як зловмисні, $\mathrm{TPR} = \frac{\mathrm{TP}}{(\mathrm{TP+FN})}$; специфічність, True Negative Rate (TNR) – відсоток незловмисних поведінок в КС, що класифіковані як незловмисні, $\mathrm{TNR} = \frac{\mathrm{TN}}{(\mathrm{TN+FP})}$; достовірність виявлення кібератак системою BotGRABBER (*Q*): $\mathrm{Q} = \frac{\mathrm{TP+TN}}{\mathrm{TP+TN+FP+FN}}$де TP (true positives) – кількість шкідливих поведінок, класифікованих як шкідливі поведінки (атаки); TN (true negatives) – кількість нешкідливих поведінок, класифікованих як нешкідливі поведінки; FP (false positives) – кількість шкідливих поведінок (атак), класифікованих як нешкідливі поведінки (помилки першого роду, хибні спрацювання); FN (false negatives) – кількість класифікованих атак як нешкідливі поведінки (невиявлення, помилки другого роду).

Крім того, здатність системи BotGRABBER забезпечувати резильєнтність корпоративних мереж за наявності кібератак була оцінена за формулою: $\mathrm{GR} = \left[\mathrm{R} \times \frac{\mathrm{SRAP_{RP}}}{\mathrm{SRAP_{DP}}}\right] \times (\mathrm{TMPL})^{-1} \times \mathrm{RCAB}$ де R – здатність до супротиву, яка вимірює продуктивність мережі між значеннями t_d і t_{ns}, $R \in [0,1]$, де 0 вказує на загальну втрату роботи та 1 - нормальне функціонування мережі; t_d – час, коли мережа є під впливом атаки; t_{ns} – час, коли мережу було налаштовано відповідно до сценарію безпеки, обраного системою BotGRABBER; $SRAP_{DP}$ - значення швидкості під час фази атаки; $SRAP_{RP}$ – величина швидкості під час фази відновлення мережі; *TMPL* – усереднене в часі значення втрати продуктивності мережі, яке враховує час появи атаки до відновлення мережі; *RCAB* – здатність до відновлення мережі, яка описує ефективність роботи мережі, досягнута після застосованого сценарію безпеки.

Щоб отримати кількість успішних реконфігурацій мережі, необхідно обчислити міру резильєнтності *GR*. Це безрозмірна метрика, яка дозволяє оцінити резильєнтність різних систем під різними типами атак. Таким чином, вважатимемо, що значення метрики GR, що перевищує заданий поріг $(\gamma > 0{,}7)$, означає, що стабільне функціонування мережі забезпечується. Досягнення необхідного значення показника *GR* після використання сценарію захисту означає, що відновлення мережі було успішним.

Результати тестування інтелектуального агента BotGRABBER для різних класів атак представлено в таблиці 1, з якої видно, що достовірність виявлення кібератак системою BotGRABBER знаходиться в межах від 90,40% до 98,42%. Більше того, чутливість TPR та специфічність TNR знаходяться в діапазоні 91,52–99,13% та 88,46–97,52% відповідно. Тому такий підхід вказує на здатність до забезпечення резильєнтного функціонування КС в умовах кіберзагроз. Інший аспект функціонування BotGRABBER – це можливість застосовувати сценарії безпеки для кібератак за допомогою реконструкції мереж. Для того, щоб з'ясувати

можливість функціонування мережі під кібератаками, були імітовані різні типи атак на мережеві хости, сервери та доступні мережеві пристрої. Таблиця 1 демонструє, що кількість успішних реконфігурацій мережі знаходиться в діапазоні від 52,0% до 85%, середнє значення – 71,2%.

Таблиця 1

Результати тестування для різних класів атак

Тип атаки	*T*	*E*				Результат			
		Зловмисні		корисні		*SN*, %	*SP*, %	*Q*, %	*SR*, %
		TP	*FN*	*TN*	*FN*				
DDoS	574	661	16	489	14	97.64	97.22	97.46	73
Ping атака	564	585	11	465	13	98.15	97.28	97.77	76
death атака	364	568	15	429	21	97.43	95.33	96.52	76
TCP SYN	563	567	10	321	7	98.27	97.87	98.12	58
Fragmented UDP Flood	554	384	33	323	29	92.09	91.76	91.94	77
Ампліфікація DNS	421	435	38	553	41	91.97	93.10	92.60	73
Скидання TCP	671	575	31	644	19	94.88	97.13	96.06	85
ICMP attack	764	541	23	565	7	95.92	98.78	97.36	54
RUDY	198	764	36	548	39	95.50	93.36	94.59	77
SIP inv. Flood	611	434	21	561	22	95.38	96.23	95.86	79
secured SSL DDoS	571	554	41	464	35	93.11	92.99	93.05	77
Ping атака	521	494	8	198	8	98.41	96.12	97.74	69
SQL/PHP-ін'єкція	381	653	29	328	35	95.75	90.36	93.88	67
XSS	439	642	39	461	41	94.27	91.83	93.24	77
Фішинг	555	457	4	354	9	99.13	97.52	98.42	70
DNS spoofing	571	453	42	253	33	91.52	88.46	90.40	76
TCP-scan	345	451	21	326	12	95.55	96.45	95.93	67
UDP-scan	231	432	12	326	12	97.30	96.45	96.93	73
Smurf	237	344	15	433	8	95.82	98.19	97.13	68
MAC flooding	655	556	13	326	11	97.72	96.74	97.35	52

Ефективність застосування запропонованої інформаційної технології доводиться порівнянням з результатами виявлення відомими засобами виявлення атак різних типів, представленими авторитетними порталами, які розміщують аналізи останніх вірусних загроз, вивчають новітні розробки в боротьбі з вірусами та оцінки поточних антивірусних продуктів [13–15].

На рис. 6 представлено діаграму, яка демонструє результати порівняльного аналізу розробленого інтелектуального агента BotGRABBER з існуючим антивірусним програмним забезпеченням щодо найнижчих та найвищих значень достовірності виявлення атак, а також рівня резильєнтності.

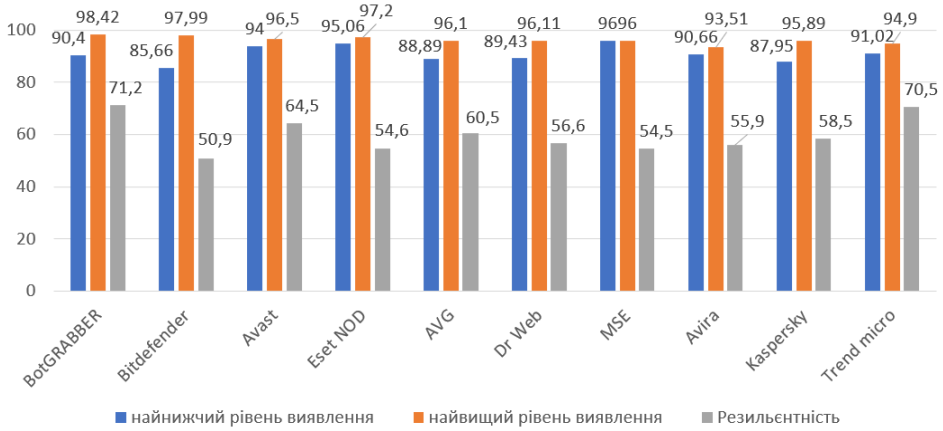


Рис. 6. Результати порівняльного аналізу інтелектуального агента BotGRABBER з існуючим антивірусним програмним забезпеченням

Висновки

Запропоновано інтелектуальний агент виявлення кіберзагроз та ШПЗ в корпоративних мережах, який представляє програмну систему із можливістю виявлення відомих та невідомих кібератак, ШПЗ мережного та хостового типу, а також здатністю продукувати множину сценаріїв безпеки для забезпечення резильєнтності КС в умовах кіберзагроз. Резильєнтність мережі та хостів забезпечується їх динамічною адаптивною реконфігурацією та множиною заходів, що дозволяють фунціонувати системам в умовах атак.

Інтелектуальний агент виявлення кіберзагроз та ШПЗ BotGRABBER – це мультивекторна система захисту, оскільки вона поєднує аналіз як в мережі, так і в активності хостів. Комбінована інформація дозволяє не тільки виявляти кібератаки різного типу, але й автоматично застосовувати необхідний сценарій безпеки мережної реконфігурації та адаптації КС відповідно до типу виявленої кібератаки.

Інтелектуальний агент забезпечує: можливість виявлення відомих та невідомих кібератак, можливість виявлення ботнетів, які використовують методи ухилення від DNS (циклічне відображення IP-адреси, "домен flux", "швидкий flux" та DNS-тунелювання), здатність самостійно застосовувати сценарії безпеки для пом'якшення кібератак, забезпечення резильєнтності корпоративних мереж в умовах кібератак, забезпечення мультивекторного захисту корпоративних мереж.

Експериментальні дослідження продемонстрували, що загальна достовірність виявлення кібератак системою BotGRABBER варіює від 90,40% до 98,42%. Більше того, чутливість та специфічність знаходяться в діапазоні 91,52–99,13% та 88,46–97,52% відповідно. Тому такий підхід вказує на здатність до забезпечення резильєнтного функціонування КС в умовах кіберзагроз.

Література

1. McAfee Mobile Threat Report Q1, 2020. URL: https://www.mcafee.com/content/dam/cons umer/en-us/docs/2020-Mobile-Threat-Report.pdf. – 9.12.2019. (application date: 10.07.2020).

2. 2020 State of Malware Report. URL: https://resources.malwarebytes.com/files/2020/02/2020_State-of-Malware-Report.pdf (application date: 10.07.2020).

3. Naval S., Laxmi V., Rajarajan M., et al. Employing program semantics for malware detection. IEEE Trans Inform Forens Secur. 2015. Vol.10. No.12. P. 2591–2604. URL: https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2469253

4. Kharraz A., Arshad S., Mulliner C., et al. UNVEIL: a large-scale, automated approach to detecting ransomware. Proc 25th USENIX Security Symp, 2016. P. 757–772.

5. Poeplau S., Fratantonio Y., Bianchi A., et al. Execute this! Analyzing unsafe and malicious dynamic code loading in Android applications. Proc Network and Distributed System Security Symp, 2014. P. 23–26. URL: https://doi.org/10.14722/ndss.2014.23328

6. Zhang F.W., Leach K., Stavrou A., et al. Using hardware features for increased debugging transparency. Proc IEEE Symp on Security and Privacy, 2015. P .55–69. URL: https://doi.org/10.1109/SP.2015.11

7. Fratantonio Y., Bianchi A., Robertson W., et al. Triggerscope: towards detecting logic bombs in Android applications. Proc IEEE Symp on Security and Privacy, 2016. P. 377–396. URL: https://doi.org/10.1109/SP.2016.30

8. Suarez-Tangil G., Conti M., Tapiador J.E. et al. Detecting targeted smartphone malware with behavior-triggering stochastic models. Proc 19th European Symp on Research in Computer Security, 2014. P. 183–201. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11203-9_11

9. Beaucamps P., Gnaedig I., Marion J.Y. Abstraction-based malware analysis using rewriting and model checking. Proc 17th European Symp on Research in Computer Security, 2012. P. 806–823. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33167-1_46

10. Yang C., Xu Z.Y., Gu G.F., et al. DroidMiner: automated mining and characterization of fine-grained malicious behaviors in Android applications. Proc 19th European Symp on Research in Computer Security, 2014. P. 163–182. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11203-9_10.

11. Canadian Institute for Cybersecurity. Botnet dataset, (accessed January 10, 2019). URL: https://www.unb.ca/cic/datasets/botnet.html.

12. Murphy K.P. Machine learning: a probabilistic perspective. 1 st edition. The MIT press., 2012. P. 1102.

13. AV Comparatives laboratories. URL: http://www.av-comparatives.org. (application date: 26.01.2020).

14. Virus Bulletin. URL: http://www.virusbtn.com (application date: 26.01.2020).

15. Comparative antivirus testing. URL: http://www.av-comparatives.org. (application date: 26.01.2020)

Надійшла / Paper received : 05.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-95-105
УДК 681.3

В.Ц. МІХАЛЕВСЬКИЙ, Г.І. МІХАЛЕВСЬКА
Хмельницький національний університет

АСПЕКТИ МІГРАЦІЇ ДАНИХ З ЛОКАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДО ГІБРИДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

В статті розглядаються аспекти міграції даних, що первинно знаходяться в локальних центрах обробки даних, до гібридної інфраструктури. Процес міграції передбачає систему заходів, серед яких розробка автоматизованої системи для синхронізації даних користувачів і врахування особливостей інфраструктури Exchange Server. Така система має проводити інвентаризацію існуючого середовища, робити звіти та конфігурувати компоненти, які приймають участь у міграціях користувачів. Система має відновити всі налаштування користувача, які існували до міграції. Після створення гібридної інфраструктури налаштовуються елементи на глобальному рівні, які будуть застосовані до різних підсистем і поштових скриньок користувачів. Важливими аспектами міграції також є корегування архітектури під специфічні умови підприємства та дослідження списку варіантів проходження пошти в гібридній інфраструктурі (харному середовищі). На дизайн і майбутню конфігурацію гібридної інфраструктури впливають безпосередньо аспекти клієнтського доступу, так як міграція в залежності від наземної архітектури може проводитися через один ЦОД або через декілька ЦОДів.

Ключові слова: *аспекти міграції даних, автоматизована система, клієнтський доступ, система для міграції, гібридна інфраструктура, хмарні сервіси, Exchange Server, Office 365, центр обробки даних (ЦОД).*

V.TS. MIKHALEVSKYI, G.I. MIKHALEVSKA
Khmelnytskyi National University

ASPECTS OF DATA MIGRATION FROM LOCAL PROCESSING CENTERS TO HYBRID INFRASTRUCTURE

The article considers aspects of data migration, which are initially located in local data centers (LDCs), to the hybrid infrastructure. The migration process involves a system of activities, including the development of an automated system for synchronizing the user data and considering the features of the Exchange Server infrastructure. Such a system should conduct the inventory of the existing environment, make reports and configure the components, involved in user migration. The system must restore all user's settings that existed before the migration. The transport part of the system is analyzed by obtaining data on the components of mail traffic, the application rules of certain actions to mail that moves from sender to recipient, and the rules for collecting information about correspondence and archiving in the archive mailbox. An important aspect of preparing for data migration is the collecting information about how the organization stores all user data and whether there are any policies related to deleting obsolete data. During collecting data about an Exchange Server organization, one of the most important steps is to gather information about how users can connect to the current environment. An important aspect is to test the AutoDiscover service, which is required to configure clients and can be used by Office 365 to connect the enterprise Exchange Server. Because many security aspects are not transferred to the cloud infrastructure during the hybrid configuration and in the process of moving users' mailboxes, migration must be performed manually. The Exchange Server mail system also contains a number of additional elements that cannot be attributed to any standard modules, such as client access, transport or data storage, but still zre required data synchronization with the cloud application. After creating a hybrid infrastructure, items are configured (imported) globally, which further will be applied to various subsystems and user mailboxes. Important aspects of migration are also the adjustment of the architecture to the specific conditions of the enterprise and the study of the list of options for the passage of mail in a hybrid infrastructure (good environment). The design and future configuration of the hybrid infrastructure is directly influenced by aspects of client access, as migration depending on the terrestrial architecture can be performed through one (main) data center or through several data centers. The proposed migration system allows many large companies to avoid the complex process of migrating global local infrastructure to the cloud and improves enterprise-level data analysis with automatic data migration management in IT environment with a complex network infrastructure.

Keywords: *data migration aspects, automated system, client access, migration system, hybrid infrastructure, cloud services, Exchange Server, Office 365, data center.*

Постановка проблеми

На даний час хмарні сервіси все частіше використовуються для потреб підприємств та збереження даних [1]. Тому тема коректної міграції даних з локальних центрів обробки до провайдерів хмарних обчислень є актуальною. Потрібно оцінити існуючу інформаційну систему [2], проаналізувати дані та безпосередньо їхню міграцію в хмарні системи.

Важливим аспектом є побудова найкращого шляху міграції у середовищах, коли компанія має багато офісів, розташованих по всій планеті, де кожний має свої інтернет-канали різної якості. Також необхідно застосувати всі налаштування та параметри, що були в локальному ЦОДі, бо за довгі роки підприємство виробляє велику кількість правил, політик, які добре працювали в локальній інфраструктурі, а після міграції даних їх потрібно перестворювати, а потім визначати відповідні налаштування.

Аспект підготовки до міграції даних полягає в тому, щоб зібрати інформацію про те, як організація зберігає всю інформацію користувачів і чи є які-небудь політики, пов'язані з видаленням застарілих даних. Крім цього, існує велика потреба в переносі налаштувань безпеки, пов'язаних із захистом інформації.

Формулювання цілей статті (Постановка завдання)

Для зниження навантаження на працівників та визначення економічної доцільним з точки зору витрат на процес міграції даних необхідно описати всю систему міграції та визначити найважливіші її аспекти. Система має бути такою, що враховуватиме потреби підприємства при інтеграції з Office 365, буде пропонувати і впроваджувати зміни для визначення оптимального шляху потоку даних та планувати перенос

даних до хмарної частини. Основним критерієм має бути рішення для процесу міграції з урахуванням сучасного підходу в IT-проектах. Для гібридної інфраструктури Exchange Server, яка є наслідком інтеграції корпоративної системи з хмарним сервісом Office 365, сформулювати рішення, що допомагають перенести фактичні дані користувачів різних видів з локальних центрів у кінцеву інфраструктуру.

Виклад основного матеріалу

Під час міграції даних від локальних центрів до хмарних сервісів необхідно брати до уваги велику кількість вимог, таких як транспортна служба, служби зберігання даних, авторизації і служби доступу до даних, календарі і адресні книги, а також служби безпеки і захисту корпоративних даних. При цьому, необхідно враховувати мережеву інфраструктуру, тому що це може вплинути безпосередньо на період та час міграції, а також інші додаткові дії, що необхідні для забезпечення міграції.

Аналіз транспортної системи. Транспортна частина, зазвичай, вимагає докладної інвентаризації, оскільки у великих організаціях має бути організовано нестандартизований доступ по протоколу SMTP: а) поверхові сканери або сервери моніторингу, які надсилають повідомлення; б) надсилання пошти на спеціальні вузли, які відповідають за пересилання пошти або обмін поштою з партнерами із примусовою аутентифікацією серверів за сертифікатами; в) застосування правил до повідомлень, які переміщуються всередині організації, виходять за межі організації або надходять від зовнішньої організації.

Щоб оцінити всі аспекти транспортної системи, необхідно отримати дані про такі компоненти:

1) Send connectors – компонент відправки пошти, інформацію отримують на рівні організації [6]. Зазвичай поштовий трафік не потребує особливих змін під час налаштування гібридної інфраструктури, але у випадку специфічної конфігурації відправлення пошти до партнерів деякі сполучні лінії (конектори) доведеться експортувати з наявної організації Exchange Server, після створення нових сполучних ліній у хмарі та застосування до них налаштування з експортованих даних. Щоб отримати всю інформацію по Send connectors, необхідно виконати такий запит:

```
$ExpPath = "C:\ExchaData\Export\"
$SendConExpPath = $ExpPath + 'SendConnectors.csv'
$SendConnectors = Get-SendConnector
$SendConnectors | select Identity, Name, AddressSpaces, IgnoreSTARTTLS, RequireOorg, RequireTLS,
SmartHostAuthMechanism, SmartHostsString, TlsAuthLevel, TlsCertificateName, TlsDomain | export:
foreach ($sendConnector in $SendConnectors) {
    $TempName = $SendConnector.name
    $Addressspaces = $sendconnector.addressspaces
    $FileName=$ExpPath+'_SEND_'+$tempName+'.csv'
    $addressspaces | Export-Csv -Path $fileName -NoTypeInformation
                                                                                    }
$SendConnectors | ft Name, addressspaces, requiretls
```

Результатом буде файл з даними в форматі, як зазначено в таблиці 1.

Таблиця 1

Формат даних, представлений по Send Connector

Name	Address Space	Require TLS
Internet	{SMTP:*;2}	False
Lotus Notes	SMTP:domino.testvg.it-infrastructures.net	False
…	…	…

В результаті цього запиту у вказаному каталозі буде файл, який містить відомості про всі Send connectors, а також список файлів, що відповідають назві конкретних конекторів, що містять простори імен, які обслуговує даний конектор.

2) Receive connectors – компонент, відповідальний за отримання пошти, інформація має бути доступна для зчитування з кожного сервера, який має транспортну роль (застосовне до старих версій Exchange Server) [6]. Отримані об'єкти повинні бути проаналізовані, щоб визначити, чи конектор створено по замовчуванню і чи не було ніяких змін в ньому, після чого все те, що не відповідає налаштуванням по замовчуванню, експортувати, щоб потім мати можливість проаналізувати і, за потреби, застосувати до конекторів, створених у хмарній службі. Щоб отримати всю інформацію по всіх Receive connectors, необхідно виконати запит, результатом якого буде список з іменами, що відповідають іменам серверів, які будуть містити докладні конфігурації всіх конекторів на даному сервері, а також зведений файл зі зведеною таблицею для звіту.

3) Transport rules – транспортні правила, які застосовують певні дії до пошти, яка переміщується від відправника до одержувача [4]. Інформація про правила транспортування зчитується на глобальному рівні організації, а також на EDGE-серверах, розташованих в мережі периметра. Зауважимо, що правила транспортування не переміщуються до хмарної служби і вони повинні бути експортовані з наявної організації Exchange Server, піддаватись аналізу, а потім імпортуватися до хмарної організації.

4) Journal rules – правила, призначені для збору відомостей про листування та архівування в архівній поштовій скриньці. Ці правила конфігуруються як на глобальному рівні для певних груп користувачів, так і на рівні баз даних поштових скриньок. На цьому етапі необхідно експортувати інформацію з глобального рівня для подальшого аналізу та імпорту до хмарної організації, оскільки існуючі засоби міграції не дають

можливості мігрувати цей тип інформації [6].

З цього моменту всі елементи, які відносяться до транспортної підсистеми, зберігаються в каталозі для експорту в файловій системі у форматі CSV (Coma Separated Value). Там же знаходяться звіти, які мають розширення TXT.

Аналіз даних користувачів поштової системи. Етап збору інформації про дані користувачів включає в собі не лише збір статистичних даних поштових скриньок користувачів, а й відомості про ресурсні поштові скриньки і спільні папки. Крім усього іншого, необхідно зібрати інформацію про те, як компанія керує інформацією користувачів, та яким є підхід до застарілої інформації.

Для того, щоб зібрати загальну статистику про обсяг даних користувачів першим етапом необхідно з'ясувати, які бази даних існують в організації і як вони розподіляються по IT-інфраструктурі всередині організації. Для цього ми можемо використовувати стандартний запит по базах даних і визначаємо додатковий параметр, який вказує на якому сервері бази даних активні. Після отримання інформації про розподіл баз даних, маємо змогу запустити циклічний запит для пошуку поштових скриньок в кожній базі даних і збору статистичних даних по них. Такий підхід дозволить зробити звіт, який відображає не тільки інформацію про конкретну поштову скриньку, але і отримати зведені відомості по кожному з Центрів Обробки Даних відносно загального обсягу інформації. На підставі отриманої інформації, буде легко обчислити, скільки часу знадобиться для міграції даних користувачів і як міграцію цих даних поділити на етапи [4]. Як наслідок, маємо змогу проаналізувати, в якому сайті Активного каталогу (Active Directory – AD) знаходиться кожна поштова скринька. Цей звіт буде корисним в майбутньому, якщо міграцію поштових скриньок заплановано проводити не через один ЦОД, а паралельно через декілька ЦОДів.

Ще один аспект підготовки до міграції даних полягає в тому, щоб зібрати інформацію про те, як організація зберігає всю інформацію користувачів і чи є які-небудь політики, пов'язані з видаленням застарілих даних (наприклад, поштові повідомлення старше 5 років). Це питання слід уточнити, оскільки елементи конфігурації не переносяться автоматично до хмарної служби. Для досягнення цієї мети нам потрібно вивантажити з конфігурації Exchange Server інформацію про всі елементи Retention Tag, а також інформацію про те, з якими елементи Retention Policy вони пов'язані.

Зібрані дані можливо буде спершу відтворити у хмарній інфраструктурі, а після міграції користувачів також можна застосувати до вже перенесених поштових скриньок. Останнім у цьому сценарії залишилось ідентифікувати і визначити на якого користувача які політики збереження даних застосовуються.

Другою немаловажною частиною аналізу збережених даних є Спільні папки. У багатьох організаціях вони є рудиментом старої інфраструктури, коли організація мала змогу зберігати там корпоративні документи, щоб забезпечити швидкий пошук необхідних даних, а також організувати порівняно недорогий і надійний інструмент автоматичної реплікації даних між різними відділеннями (офісами). В останніх версіях Exchange Server реплікації даних більше не підтримується, але дані, які організація може зберігати в спільних папках, можуть бути використані, а обсяг даних може бути критично великим [2].

Для того, щоб підготуватися до міграції спільних папок в хмарну інфраструктуру, необхідно також проаналізувати, який обсяг даних у якому ЦОДі зберігається. Для цього потрібно зібрати статистичні дані про обсяги поштових скриньок, призначених для зберігання даних спільних папок (Public Folder Mailboxes) та ідентифікувати їх в ЦОД. Слід зазначити, що коли ми аналізуємо Спільні папки, необхідно також проаналізувати наявність обмежень по кожній з папок та з'ясувати, чи є у будь-якої з папок поштова адреса, яка асоціюється з нею. Результати, отримані на даному етапі, необхідно буде звірити пізніше, після міграції Спільних папок, що є критичним для багатьох організацій.

Аналіз клієнтського доступу до системи. Під час збирання даних про організацію Exchange Server одним з найважливіших етапів є збір даних про те, як користувачі можуть підключатися до поточного оточення. На сьогоднішній день Exchange Server пропонує наступні варіанти підключення:

- MAPI – Mail Application Program Interface, який є протоколом, що інкапсульовано до протоколу HTTPS і працює по порту TCP-443. Даний протокол є найбільш бажаним, оскільки він є найлегшим та функціональним водночас. Однак він підтримується лише останніми версіями Outlook.

- Outlook Anywhere, або як його ще раніше називали, RPC over HTTPS. За функціоналом він такий самий як і попередній протокол, хоча значно важчий і повільніший за рахунок того, що він використовує ще один рівень інкапсуляції. Протокол верхнього рівня MAPI інкапсулювався в RPC (раніше рідний протокол Exchange Server), після чого інкапсулювався в HTTPS, задіявши вбудовану у Windows службу RPC-Proxy (RPC over HTTPS Feature). Даний протокол завершує використання в нових версіях Exchange Server та існує лише для підтримки старих клієнтів Outlook. Протокол також працює по порту TCP-443.

- Допоміжним протоколом для роботи клієнта Outlook є протокол завантаження Оффлайнової Адресної Книги – OAB (Offline Address Book). Даний протокол просто дозволяє клієнту скачати групу файлів, які є кешем адресної книги на випадок недоступності Інтернет (порт TCP-443).

- Active Sync – протокол, призначений для підключення та роботи з Exchange Server з мобільних пристроїв. Цей протокол дозволяє мобільним пристроям працювати з поштою, календарями, адресною книгою, особистими правилами і, звичайно, працювати з Спільними папками. Протокол також дозволяє керувати мобільними пристроями та застосовувати політику безпеки для них, щоб мати змогу захистити корпоративну інформацію на мобільних пристроях. Цей протокол працює, як і попередні протоколи, поверх протоколу HTTPS, а, отже, покладається на порт TCP-443.

- Протокол EWS (Exchange Web Services) — це універсальний інтерфейс підключення до Exchange Server для розробників та сторонніх додатків, наприклад, Skype For Business Server використовує його для отримання інформації про одержувачів Exchange Server. Він також використовується клієнтами Outlook для отримання інформації про зайнятість тих чи інших ділянок зібрання (Free/Busy) і отримувати випливаючі підказки Mail Tips. Протокол працює як розширення протоколу HTTPS.

- Для тих користувачів, які не мають поштового клієнта, є протокол, який дозволяє підключати і працювати з поштою через звичайний браузер – Outlook Web Application (OWA). Цей протокол дозволяє користувачеві не тільки повноцінно працювати з усіма функціями поштової скриньки, але і робити це без Інтернету – оффлайнова робота (підтримується не всіма браузерами).

- Нестандартними протоколами підключення до Exchange Server є протоколи POP3 та IMAP4. Обидва протоколи вкрай лімітовані по функціоналу і є вразливі з точки зору безпеки. Протоколи використовують для безпечного підключення портів TCP 995 та 993 відповідно. Дані протоколи призначені виключно для отримання поштових повідомлень і відправки повідомлень. Вимагається протокол SMTP, який для клієнтів працює на стандартному TCP порті 587. За умовчанням, ці протоколи вимкнено, і, якщо вони використовуються організацією, вони повинні бути ввімкнені в Office 365 і налаштовані відповідно (наприклад, для того, щоб деякі пріоритетні додатки мали можливість завантажити пошту з Exchange Server).

- Для автоматичного налаштування поштових клієнтів використовується протокол AutoDiscover, який дозволяє клієнту отримати параметри підключення до Exchange Server, що значно спрощує налаштування клієнтської частини. Даний протокол працює так само поверх HTTPS та підтримується всіма клієнтами Outlook та значною кількістю Мобільних клієнтів, працюючими за протоколом ActiveSync.

При оцінюванні інфраструктури Exchange Server необхідно зняти параметри та налаштування зі всіх протоколів, тому що: а) частина протоколів не переноситься, як наприклад POP3 та IMAP4; б) частина протоколів використовується хмарним сервісом для підключення до Exchange Server організації (протокол EWS) [6]; в) протокол OWA потребує ще і ретельного перенесення політик, застосованих до WEB додатків, призначених для браузерів.

Параметри всіх протоколів та пов'язаних з ними об'єктів мають бути експортовані, а також оформлені у вигляді табличних звітів для подальшого аналізу, після чого багато отриманих даних будуть доступні як параметри підключення до мережі Exchange Online для організації Exchange Server, а також у якості параметрів конфігурації для клієнтів PO3 та IMAP4, які, як відомо, не мігрують в Office 365.

Збір інформації про підключення починається із зібрання інформації про протоколи, які можуть використовувати Office 365 для підключення до внутрішньої інфраструктури Exchange Server. Для цього необхідно збирати параметри таких протоколів, як MAPI та Outlook Anywhere, але передумовою є те, що протокол повинен мати можливість зовнішнього з'єднання із сервером Exchange Server. Таким чином, аналізуємо лише ті протоколи, де параметр External URL не має пустого значення. Якщо цей параметр містить пусте значення, це означає, що підключення до цього сервера із зовнішнього світу неможливе. Результати також повинні бути проаналізовані на предмет того, на яких сайтах Active Directory знаходяться сервери, відповідальні за обслуговування даних з'єднань. Такий підхід дозволить в подальшому визначити, які поштові скриньки і через які сервери зручніше мігрувати до Office 365 (якщо організація має більше одного підключення до Exchange Server з Інтернету).

Всі протоколи працюють на захищеному каналі HTTPS. Таким чином, для ініціалізації безпечного підключення потрібен цифровий сертифікат. Для того, щоб Office 365 мав змогу прийняти цей сертифікат для встановлення безпечного з'єднання, цей сертифікат має відповідати низці вимог [4, 6]: а) сертифікат повинен бути виданий комерційним центром сертифікації, якому довіряють сервери у ЦОДах Microsoft; б) поле Subject або Subject Alternative Name (SAN) має містити ім'я, яке відповідає Fully Qualified Domain Name (FQDN), ім'я сервера із зовнішнього атрибуту External URL, який було видобуто на попередньому кроці; в) одна з цілей сертифікату повинна бути Server Authentication; г) сертифікат має бути дійсним з точки зору терміну служби; д) сертифікат не повинен бути відкликаний центром сертифікації, що його видав. Тому, щоб отримати всі вищезазначені відомості, необхідно отримати параметри сертифіката з кожного можливого зовнішнього підключення та зберегти його як звіт.

Важливим аспектом є перевірка служби Autodiscover, яка потрібна для налаштування клієнтів і може використовуватись Office 365 для підключення до корпоративного Exchange Server. Для того, щоб отримати параметри цієї служби необхідно так само, як і на попередніх кроках, вивантажити параметри Autodiscover і відповідні сертифікати з їх параметрами.

Аналіз елементів безпеки. Exchange Server, як і багато інших продуктів, містять ряд компонентів, відповідальних за безпеку. Головна мета компонентів безпеки є: а) захист даних користувача від видалення; б) захист корпоративних і персональних даних від витоку; в) захист доступу до поштової системи від зовнішнього світу через веб-інтерфейс; г) захист інформації на мобільних пристроях; д) захист Exchange Server від змін конфігурації. Практично всі перераховані аспекти безпеки не переносяться до хмарної інфраструктури під час гібридної конфігурації та в процесі переміщення поштових скриньок користувачів, і тому міграція має виконуватися вручну. Першим елементом безпеки є In-Place Hold Policy, який дозволяє на корпоративному рівні визначати, в яких поштових скриньках повинні утримуватись дані, за якими критеріями і на який період. Цей елемент потрібен для організацій, які мають сумніви в тому, що працівник може видалити всю інформацію зі своєї поштової скриньки перед тим, як буде звільнений. Використовуючи

ж дані політики, служба безпеки може позначити всі або деякі повідомлення відповідно до певних критеріїв і вказати, що після видалення користувачем повідомлення буде зберігатися протягом деякого часу або нескінченно довго. Цей лист буде доступний людині з відповідними дозволами. Далі експортують усіх користувачів з інформацією про те, яким чином у них встановлена пошта на утримання.

Наступний елемент безпеки в Exchange Server є Data Los Prevention (DLP) Policies (Політики захисту витоку інформації) [5, 6]. Цей елемент є частиною транспортної системи і здатний аналізувати повідомлення не тільки під час переїзду, але і в процесі введення повідомлення в Outlook, повідомивши користувачеві, що він планує відправити лист з контентом, який являє собою секретну інформацію. Варто також зауважити, що ці політики можуть містити як регулярні вирази, налаштовані адміністратором, так і зразки документів, які система сама розкладе на набір регулярних виразів, а потім виконає порівняння з вкладенням на його "подібність" з вираженням у відсотковому співвідношенні. Особливу увагу треба звернути на те, що політики DLP самі по собі є контейнером для правил транспортування а, отже, працювати безпосередньо з ними не видається можливим, але вони можуть бути експортовані як набір правил у файлі XML.

Слід також зазначити, що ці політики можуть містити різноманітні словники та підказки, які також повинні бути експортовані і збережені в файлах, які можуть бути імпортовані в хмарну інфраструктуру.

На етапі аналізу доступу до Exchange Server через WEB-інтерфейс необхідно проаналізувати та експортувати політики захисту WEB-додатків (Outlook Web Application Policy). Дані політики визначають, які дії можуть виконувати користувачі, підключившись до Exchange Server за допомогою браузера WEB-інтерфейсу. Також за допомогою даних політик можна визначити, з яким типом корпоративних даних може працювати користувач. Елемент безпеки на Exchange, що відповідає за захист даних на мобільних пристроях, називається політикою мобільних пристроїв. Цей елемент керує тим, які дані завантажити на мобільний пристрій, і які функції пристрою доступні для кінцевого користувача (наприклад, заборона пересилки повідомлень, заборона передачі даних через Bluetooth або відмова в доступі до вбудованої камери, щоб запобігти можливості зробити знімок з корпоративних моніторів або документів). Для того, щоб зняти подібний елемент необхідно виконати скрипт, який експортує детальну інформації про політики з усіма параметрами, а також виконає експорт всіх користувачів з інформацією про те, яка політика на них застосовується.

Аналіз інших елементів. Поштова система Exchange Server також містить ряд додаткових елементів, які не можна віднести до будь-яких стандартних модулів, таких як клієнтський доступ, транспорт або ж зберігання даних, однак все одно вимагають синхронізації даних з хмарним додатком.

До таких елементів можна віднести: а) адресні списки; б) офлайново адресні книги; в) політики адресних книг; г) динамічні групи; д) адресні списки. Дані елементи або не переносяться в хмарну інфраструктуру, або взагалі не існують, як у випадку з динамічними групами розсилки. Отже, всі зазначені елементи повинні бути експортовані для подальшого аналізу і розуміння, що можна буде просто імпортувати в Office 365, а що доведеться замінювати альтернативними рішеннями за допомогою скрипта [6].

```
$ExpPath = "C:\ExchaData\Export\"
$DYNRep = $ExpPath+'DYN_GROUPS.csv'
Get-DynamicDistributionGroup | Select ALias, Dysplayname, Notes, RecipientFilter, RecipientFilter
| Export-Csv -Path $DYNRep -NoTypeInformation
```

Динамічні групи залишаються для дослідження внутрішньою службою фахівців, так як повного аналогу даного об'єкта в хмарній частини інфраструктури не існує. Єдиним аналогом можуть бути групи Office 365. Однак цей об'єкт не є прямим аналогом і визначення динамічності не відповідають локальним (наприклад, в хмарній інфраструктурі немає такого поняття як Organizational Units), а, отже, необхідно провести ручне дослідження.

Адресні списки, так само, як офлайнові адресні книги є виключно об'єктом окремої Exchange організації. В гібридній інфраструктурі по суті співіснує дві і більше організації, не маючи загального Активного каталогу (Активний Каталог з локальної організації синхронізує дані в хмарну службу каталогів Azure Active Directory). Такі об'єкти як адресні списки не синхронізуються, так як в локальній інфраструктурі їх визначення знаходиться в розділі Configuration Активного Каталогу. Даний розділ навіть не синхронізується і, більш того, за замовчуванням робота з ними заблокована. Єдиною, що є майже однаковою, то це Глобальна Адресна Книга (GAL). Це пов'язано з тим, що її визначення і в локальній, і в хмарної службі просте - «відображати всіх отримувачів Exchange Server». Таким чином, якщо вона синхронізує всі облікові записи користувачів з локального AD в Хмарний, то і GAL буде однаковою. Адресні списки зберігають в собі визначення запитів, які дозволяють вибрати з Глобальної Адресної Книги деяку кількість отримувачів (за якимось критеріями). Однак, і в хмарній, і в локальній організаціях Exchange Server є ряд стандартних адресних списків, які створюються за замовчуванням. Тому експорт скриптом повинен виключати таки адресні списки. Такий скрипт аналізує експортований адресний список на сумісність з Office 365 і, якщо даний адресний список несумісний, він інформує про це оператора і експортує визначення даного адресного списку в окремий файл.

Офлайнова адресна книга необхідна користувачам, які працюють на клієнті Outlook і програмному пакеті Microsoft Office Suite. Основне призначення даного об'єкта полягає в тому, щоб користувач міг використовувати адресну книгу підприємства в той час, коли немає з'єднання з Exchange Server. За замовчуванням в Exchange Server створюється офлайнова книга за замовчуванням "Default Offline Address

Book" і, якщо організація невелика, то нею всі можуть користуватися, так як вона не буде великого розміру. Однак, якщо в організації Exchange зберігаються дані про тисячі користувачів з фотографіями та сертифікатами для шифрування пошти, розмір такої книги може займати кілька гігабайт**.** З метою зменшення розміру обсягу переданих і збережених даних на клієнтських робочих станціях створюють додаткові офлайнові адресні книги, які зберігають інформацію тільки про деяких одержувачів (наприклад, з даного регіону). З цього випливає, що необхідно відтворити всі офлайнові адресні книги організації в хмарній інфраструктурі, після чого застосувати їх на переміщені в хмару поштові скриньки, відповідно до їх налаштувань в локальній інфраструктурі.

Політики адресних книг є останнім елементом, який пов'язаний з адресними списками. Даний тип об'єкту дозволяє зв'язати воєдино різні типи даних, такі як адресні списки, офлайнові адресні книги, списки переговорних кімнат і застосувати до профілю користувача, тим самим ми можемо визначити, які адреси користувач зможе бачити онлайн, а які в офлайн. Повноцінне перенесення потребує експорту даних політик, а також інформації про те, на які поштові скриньки вони застосовуються. Наостанок, необхідно експортувати інформацію про поточний стан інфраструктури Exchange Server. Щоб отримати таку інформацію можна звернутися до вбудованого API, який дозволяє з'ясувати як інформацію верхнього рівня, так і детальну інформацію щодо кожного компонента кожної підсистеми на найнижчому рівні. В даному випадку виникає завдання витягти тільки інформацію верхнього рівня і при аналізі, якщо буде потрібно, розслідувати проблемні причини на більш низьких рівнях, виконавши звернення до того ж інтерфейсу за допомогою скрипта. Після того, як дані об'єкти були експортовані, їх необхідно вивчити на предмет критичних помилок, з'ясувати, до яких компонентів належать дані помилки і виконати усунення несправності. Після того, як всі несправності будуть усунені, можна переходити до наступної стадії проекту – створення гібридної інфраструктури.

Формування звіту про знайдені елементи інфраструктури поштової організації. По закінченню обробки інфраструктури Exchange Server, в обумовленому каталозі буде збережено два типи даних: 1) Дані, експортовані з поточної інфраструктури, які необхідно буде імпортувати в хмарну інфраструктуру. Звіт про дані у вигляді набору таблиць, який можна проаналізувати і зробити свої корективи; 2) Дані, які будуть містити статистику за обсягом призначених для користувача даних з поділом по Центрах обробки даних. Звіт про стан всієї інфраструктури (верхній рівень). Після формування всіх даних можна переходити до наступного етапу - обліку потреб підприємства в умовах майбутньої гібридної конфігурації.

Після того, як вся інвентаризація проведена, а дані з поточної конфігурації Exchange Server експортовані, можна встановлювати первинне налаштування гібридної інфраструктури і переносити елементи поточної конфігурації, щоб до моменту перенесення призначених для користувача даних інфраструктура була в робочому стані.

Первинна конфігурація гібридної інфраструктури виконується в двох основних режимах.

1. Для швидкого перенесення призначених для користувача даних в хмару. У цьому випадку між локальною організацією Exchange Server і хмарною службою Office 365 налаштовується виключно рух пошти. Федеративних довірчих відносин між організаціями не встановлюється. Така конфігурація підходить виключно під підприємств малого бізнесу.

2. Для великих підприємств необхідно встановлювати повноцінні федеративні довірчі відношення. У цьому випадку встановлюється не тільки рух повідомлень між локальною організацією Exchange Server і хмарною службою Office 365, але і встановлюється довірче відношення між визначеним Exchange Server, якого опубліковано в інтернет, і хмарною інфраструктурою на рівні служби EWS. Таким чином, хмарний сервіс зможе комунікувати з локальною організацією Exchange Server через WEB API, завдяки чому користувачі, що знаходяться в хмарному сервісі, можуть перевіряти стан зайнятості в календарях користувачів, чиї поштові скриньки знаходяться в локальній інфраструктурі і навпаки. Так само, саме через цю федерацію встановлюється делегування дозволів на загальні поштові скриньки з обох частин гібридної інфраструктури.

Рис. 1. Зразок інтерфейсу конфігурування гібридної інфраструктури

Компанія Microsoft надає можливість налаштування первинної гібридної інфраструктури виключно за допомогою Hybrid Configurations Wizard (HCW), зразок інтерфейсу відображено на рисунку 1, який досить простий у використанні: а) необхідно зробити попереднє налаштування синхронізації AD для всіх користувачів, які мають поштові скриньки, а також облікові записи всіх ресурсних поштових скриньок і груп розсилки, які використовуються Exchange Server; б) обов'язково на сервері, який буде використовуватися для прямої федерації, повинен бути встановлений комерційний сертифікат для можливості ініціювати HTTPS-з'єднання.

Перенесення елементів конфігурації в хмарну частину гібридної інфраструктури. Після того як ми створили гібридну інфраструктуру, необхідно спочатку налаштувати (імпортувати) елементи на глобальному рівні, які потім будуть застосовані до різних підсистем і поштових скриньок користувачів. Перед початком імпортування необхідно встановити підключення із середовища PowerShell до Exchange Online, як зазначено нижче [4, 6]:

```
$UserCredential = Get-Credential
$Session = New-PSSession -ConfigurationName Microsoft.Exchange -ConnectionUri https://outlook.office365.com/powershell-liveid/ -Credential $UserCredential -Authentication Basic -AllowRedirection
Import-PSSession $Session -DisableNameChecking
```

Далі можна створювати елементи.

- Transport Rules. У першій частині транспортні правила були експортовані як колекція об'єктів. Завдяки тому, що хмарний Exchange Server має практично таку ж архітектуру, отже, і інтерфейс управління в середовищі PowerShell, збережені дані можна імпортувати в Exchange Online. Однак, слід враховувати, що деякі правила можуть і не імпортуватися. Подібна ситуація може виникнути в результаті того, що всередині транспортного правила використовується посилання на абсолютний ідентифікатор об'єкта, який був в локальному Exchange Server. Прикладами з такими посиланнями можуть послужити правила із застосуванням шаблонів безпеки RMS (Right Management System). Справа в тому, що локальний Exchange Server використовує посилання на шаблон локальної служби RMS, в той час як Exchange Online посилається на Хмарний аналог даної служби. Коли виникає подібна ситуація, транспортні правила, що містять дані посилання, висвітлять помилку при імпорті. Відповідальний за міграцію фахівець повинен буде спершу в Office 365 налаштувати службу RMS, включаючи шаблони, після чого відтворити правило вручну.

- Journal Rules**.** Даний тип об'єктів, як і попередній клас об'єктів, імпортується із збереженого файлу з колекцією. Єдиним обмеженням, яке може викликати помилку при імпорті, є посилання на поштову скриньку, призначену для зберігання архівів, яка розташована в Exchange Online. У відповідності з поточними правилами, поштова скринька для зберігання архівів корпоративного листування не повинна розташовуватись в Office 365 і в безкоштовній поштовій службі Microsoft Outlook®. Якщо ж поштова скриньку для архівів буде перебувати в локальному Exchange Server помилки не буде. Імпорт проводитися так само, як і попередній об'єкт.

- Retention Policies and Retention Tags**.** Якщо в локальній інфраструктурі використовувалися політики видалення повідомлень і підприємство бажає, щоб ці ж політики застосовувалися для поштових скриньок, які повинні будуть переміститься в Exchange Online, то в цьому випадку дані політики та їх складові об'єкти необхідно відтворити в хмарному сервісі. Для цього спочатку необхідно імпортувати скриптом визначення всіх об'єктів класу Retention Policy Tag [6].

Після того, як всі теги відтворено, необхідно відтворити політики і пов'язати їх з тегами, які були в локальній конфігурації. Для цього імена файлів зі списком тегів використовуємо як ім'я політики, а вміст тих же файлів використовуємо як посилання на теги, які вже створені (імена файлів починаються зі стандартного префікса, який був заданий при імпорті, а отже, всі файли з налаштуваннями політик можуть бути ідентифіковані) [6]. Надалі, коли користувачів буде мігровано в хмарний сервіс, ми зможемо прив'язати політики до відповідних поштових скриньок.

Перенесення допоміжних елементів конфігурації. Опціональним кроком після того, як основні елементи безпеки імпортовані в хмарну частина гібридної організації Exchange Server, може бути імпорт елементів, пов'язаних з адресними книгами. Якщо компанії дані елементи необхідно імпортувати, то перед імпортом необхідно виконати ряд додаткових кроків, пов'язаних з тим, що за замовчуванням робота з адресними книгами заблокована (навіть глобальний адміністратор не має повноважень управляти адресними книгами). Щоб включити доступ в консолі управління Exchange Server (Online) необхідно додати до Менеджмент Групи «Organization Management» роль «Address Lists», після чого перезавантажити консоль PowerShell:

```
$UserCredential = Get-Credential
$Session = New-PSSession -ConfigurationName Microsoft.Exchange -ConnectionUri https://outlook.office365.com/powershell-liveid/ -Credential $UserCredential -Authentication Basic -AllowRedirection
Import-PSSession $Session
New-ManagementRoleAssignment -Role "Address Lists" -SecurityGroup "Organization Management"
```

Після перезавантаження консолі і підключення до управління Exchange Online, необхідно виконати ще одну команду, яка включає управління адресними списками:

```
Set-TransportConfig -AddressBookPolicyRoutingEnabled $true
```

З цього моменту можливо управляти адресними списками.

Імпорт адресних списків проводиться з файлу, який попередньо було експортовано. Адресні списки, які не сумісні за своїми формами з форматом Office 365, експортуються в окремий файл. Списки, які готові для імпорту, зберігаються в іншому файлі і запуск скрипта для імпорту зробить всі необхідні дії. Після імпорту адресних списків можна здійснювати імпорт офлайнових адресних книг, які було створено додатково до основної офлайнової адресної книги. Політика адресних книг є останнім класом об'єктів, який імпортується в хмарну інфраструктуру. Він пов'язує адресні списки, офлайнові адресні книги, списки приміщень і глобальні адресні книги в єдину політику, яка згодом застосовується до поштової скриньки користувача.

Після цієї події базова інфраструктура Exchange Server Online стала відповідати критеріям локальної організації, так як в ній створено всі об'єкти, на які надалі будуть посилатися призначені для користувача дані. З цього моменту можна починати виконувати більш тонкі налаштування.

Корегування архітектури під специфічні умови підприємства. Коли вся інформація про поточну інфраструктуру зібрана, настає другий етап в процесі побудови гібридної інфраструктури. Його завданням є зібрати всю інформацію про те, як підприємство хоче, щоб гібридна інфраструктура працювала: як рухалася пошта, які аспекти безпеки повинні враховуватися, і які елементи поточної інфраструктури повинні переноситися в хмару, а які ні. Для цього нам необхідно зібрати ряд заявок з підприємства, які згодом вплинуть на конфігурацію гібридної інфраструктури.

Аспекти, що впливають на транспортні елементи. Першим і найголовнішим аспектом при побудові гібридної інфраструктури є транспортна частина. Якщо в наземній інфраструктурі Exchange Server пошта могла приходити через один сервер або через кілька серверів, то в гібридній інфраструктурі список варіантів значно розширюється і підприємство повинно вибрати варіант із врахуванням всіх переваг і недоліків.

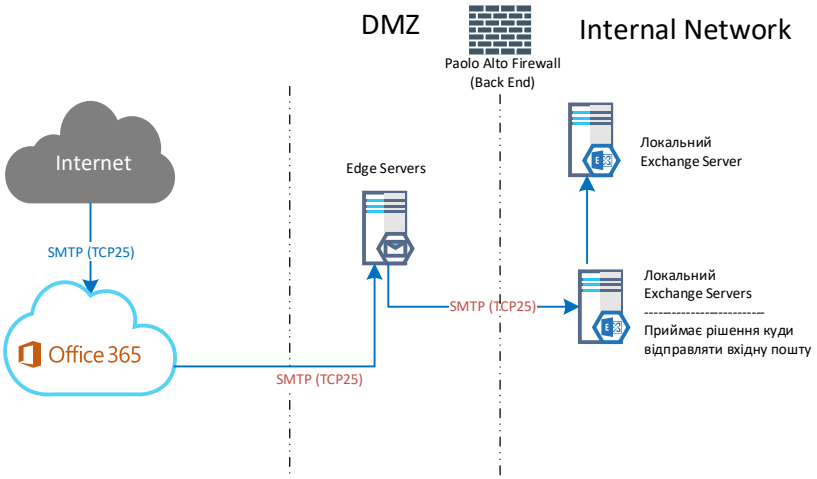


Рис. 2. Вхідна пошта через O365

Варіант для вхідної пошти 1. Пошта централізовано приходить в Office 365, обробляється хмарною системою боротьби з небажаною поштою, антивірусною системою, після чого, пошта призначена для поштових скриньок, що знаходяться в Office 365 доставляється до одержувача, а пошта призначена для одержувачів в наземній частині організації Exchange Server доставляється на заздалегідь визначений сервер, після якого почнеться стандартна маршрутизація, властива для Exchange Server (рисунок 2).

Даний сценарій являє собою збалансованість між безпекою та ефективністю з точки зору навантаження на сервери, що знаходяться в локальному центрі обробки даних: а) Пошта перевіряється найсвіжішими антивірусними сигнатурами; б) На локальні сервери приходить вже очищена пошта, що значно знижує навантаження на процесорні потужності; в) Навантаження на мережеву інфраструктуру значно знижується, тому що навантаження з прийому всієї пошти покладається на хмарну інфраструктуру, а локальна буде навантажувати тільки тієї поштою, яка залишилася в локальних серверах.

В даному випадку підприємство повинно визначитися тільки з одним параметром: через які сервери (або в якийсь центр обробки даних) буде надходити пошта з хмарної інфраструктури в локальну. Решта значення не має. На довершення необхідно переконфігурувати MX-записи по всіх поштових доменах - вони в подальшому повинні будуть вказувати на поштову службу Office 365 - Exchange Online, яка буде знаходитися в зоні mail.protection.outlook.com.

Варіант вхідної пошти 2. Вся пошта організації, що надходить на локальні поштові сервери (все залишається без змін), локально обробляється системами боротьби з небажаною поштою, а також системами боротьби зі шкідливим ПЗ. Після цього пошта, призначена для локальних одержувачів, відправляється в поштові скриньки, а пошта, призначена для одержувачів, чиї поштові скриньки знаходяться в Office 365, перенаправляється в хмару відповідальними за дану комунікацію серверами. Там дана пошта перевіряється ще раз службами боротьби з шкідливим ПЗ (служби боротьби з небажаною поштою в даному випадку не будуть задіяні, так як пошта була відправлена з довіреної системи), і після цього доставляється в поштові скриньки.

Перевагами даної конфігурації можуть бути наступні: а) Вся вхідна пошта перевіряється

карантинними системами того провайдера, якого забажає менеджмент підприємства; б) Вся вхідна пошта обов'язково проходить через локальні системи, а значить, інформація про всі листи буде зберігається в локальних файлах відстеження. Дана конфігурація може бути найважливішим критерієм при ухваленні рішення про те, як пошта повинна переміщатися з боку служби безпеки; в) Побічним же ефектом даної конфігурації є те, що локальні сервери надлишково навантажуються, як з точки зору процесорних потужностей, так і з точки зору мережевої інфраструктури. Ще одним прихованим недоліком такої конфігурації є надмірне використання інформації на жорстких дисках, так як Exchange Server при проходженні пошти до його транспортної підсистеми зберігає пошту в своїх поштових чергах певний термін (за замовчуванням два дні) на випадок збою, як система відмовостійкості (пошта може бути затребувана тією системою, куди була відправлена, але з якихось причин загублена). Таким чином, даний варіант з точки зору продуктивності менш ефективний, але дозволяє серйозно поліпшити транспортну систему з точки зору безпеки. Єдиним параметром, який організації потрібно визначити в цьому варіанті: які сервери будуть відповідальними за обмін поштою з Office 365.

Варіант вхідної пошти 3**.** Вся пошта організації надходить в Office 365. Там відбувається перевірка пошти, як і в першому варіанті, але після цього вся, без винятку, пошта пересилається в локальну організацію Exchange Server, де пошта перевіряється ще раз додатковими службами, відповідальними за боротьбу з небажаною поштою та шкідливим ПЗ. Після цього пошта, призначена для локальних одержувачів, доставляється прямо в їх поштові скриньки, а пошта, призначена для одержувачів, чиї поштові скриньки знаходяться в Office 365, знову відправляється до хмарної інфраструктури. Там транспортна підсистема визначить, що повідомлення отримано із довіреної системи і доставить прямо в поштову скриньку одержувача без додаткових перевірок. Даний варіант має наступні характеристики: а) основні атаки з інтернет на транспортні служби жодним чином не стосуються локальних серверів; б) пошта перевіряється як хмарними, так і наземними службами, що дозволяє зробити систему вкрай захищеною з точки зору загроз, пов'язаних з передачею небажаного контенту; в) пошта, як і в другому варіанті, проходить обов'язково через локальну транспортну систему, а отже, залишає слід в файлах трасування, що є великою перевагою з точки зору служби безпеки, що займається розслідуваннями, пов'язаними з витоком інформації та ін; г) локальна система менше навантажується на рівні процесорних потужностей і дискової підсистеми, так як більша частина небажаної пошти буде відфільтрована на етапі проходження через «фільтри» Office 365. Єдиним недоліком даної конфігурації є те, що буде навантажуватися транспортна система, через те, що пошта, призначена для одержувачів в Office 365, буде робити фактично петлю, що відіб'ється на продуктивності самої системи.

При виборі даної конфігурації підприємство повинно визначити, через які сервери з якого центру обробки даних буде проходити пошта під час комунікації з Office 365. Також необхідно буде, як і в першому варіанті, налаштувати MX-запис таким чином, щоб він вказував на сервери служби Exchange Online Protection, які знаходяться в зоні mail.protection.outlook.com.

Щодо **вихідної пошти,** то вона також може мати три конфігурації, проте вони відрізняються від конфігурацій, пов'язаних із вхідною поштою [2].

Варіант вихідної пошти 1. Сценарієм руху вихідної пошти за замовчуванням є сценарій, при якому вся локальна пошта продовжує відправлятися в зовнішній світ так само, як і до налаштування гібридної інфраструктури: відправка йде з локальних серверів. Пошта, яка відправляється з поштових скриньок, що знаходяться в хмарній інфраструктурі, буде йти безпосередньо зі служби Exchange Online. Єдиною дією в даній конфігурації, яку потрібно зробити, - налаштувати корпоративну службу DNS, щоб у всіх поштових доменах SPF-запис вказував не лише на локальні сервери, але і на службу Exchange Online Protection, з якої тепер теж будуть відправлятися корпоративні листи. Плюсами даної конфігурації є те, що вона вимагає мінімальних налаштувань. Однак, якщо в компанії стоїть питання конфігурації захисту від витоку інформації, то цю систему доведеться налаштовувати як в хмарі, так і в локальній інфраструктурі (паралельно), що збільшує навантаження на обслуговування даної системи (збільшення вартості), а також збільшує ризик того, що при внесенні змін до однієї частини (наприклад, хмарної), точно такі ж зміни забудуть внести в локальній частині або зроблять з помилками (порушується цілісність конфігурації), що може призвести до інцидентів, пов'язаних з безпекою.

Варіант вихідної пошти 2. Вся вихідна пошта відправляється виключно через Office 365. У цьому випадку в локальній організації Exchange Server необхідно поміняти налаштування основного конектора, відповідального за відправку пошти в Office 365, таким чином, щоб він відповідав не тільки за пересилку пошти по доменному суфіксу «onmicrosoft.com» і «mail.onmicrosoft.com», а й додати простір імен «*». На додачу, в кожній з поштових зон DNS необхідно додати або виправити (якщо така вже існує) SPF-записи на такі, які будуть запропоновані в Office 365 (рисунок 3).

Дана конфігурація зручна з наступних причин: а) з точки мінімізації навантаження на локальні ресурси вся пошта відправляється з локальної організації в хмарну, де буде проводитися аналіз на предмет витоку інформації і так далі; б) управління захистом від витоку інформації проводиться централізовано.

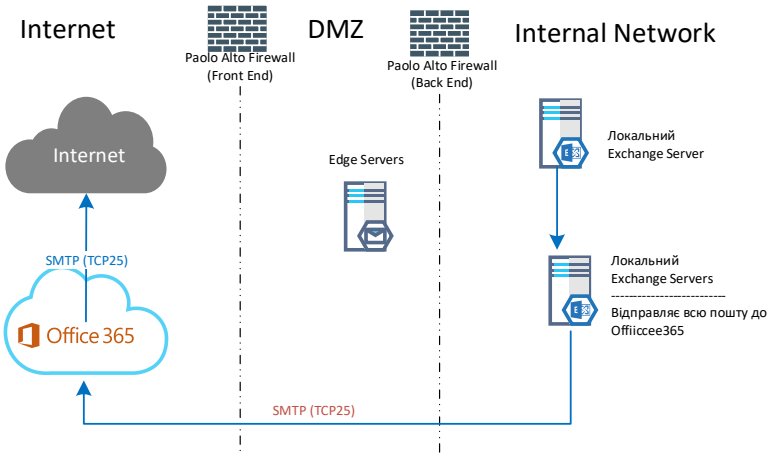


Рис. 3. Вихідна пошта системи через сервери O365

Варіант вихідної пошти 3. Вся вихідна пошта відправляється в локальну інфраструктуру і, після всіх перевірок на предмет захисту від витоку інформації, відправляється до зовнішнього світу. Дана конфігурація вимагає зробити єдине налаштування в Office 365 – налаштувати конектор, який відповідає за відправку пошти у зовнішній світ, таким чином, щоб він більше не перенаправляв пошту прямо, а відправляв її в локальну інфраструктуру Exchange Server. Дана конфігурація має наступні переваги: а) Вся пошта, яка проходить через локальну інфраструктуру, буде залишати інформацію про листи в локальних файлах відстеження; б) Система захисту від витоку інформації не обмежується тільки тією, яка вбудована в Exchange Server. При даній конфігурації служба безпеки може використовувати і сторонні служби захисту від витоку інформації. Саме так в більшості великих фінансових і урядових компаній і роблять.

Аспекти клієнтського доступу, які впливають на дизайн і майбутню конфігурацію гібридної інфраструктури. Якщо в організації один ЦОД з єдиним каналом в інтернет, тоді маємо єдиний сценарій міграції призначених для користувача даних. Але якщо в компанії кілька ЦОДів, доступні наступні варіанти для міграції: 1) Міграція через єдиний (основний) центр обробки даних. Підприємство самостійно приймає рішення щодо того, який ЦОД буде основним, і далі вся міграція буде йти через нього. Даний тип міграції, за замовчуванням легко налаштовується з боку управління Office 365; 2). Міграція через кілька ЦОДів. У цьому випадку підприємство приймає рішення, що дані користувача повинні переноситися в Office 365 таким чином, щоб дані з одного ЦОДу ні в якому разі не мігрували через сервери іншого, при наявності клієнтського доступу з інтернету. Даний сценарій зручний, насамперед тим, що передачу даних можна вести в кілька потоків (при передачі даних компанія Microsoft обмежує пропускну здатність смуги з одного ЦОДу).

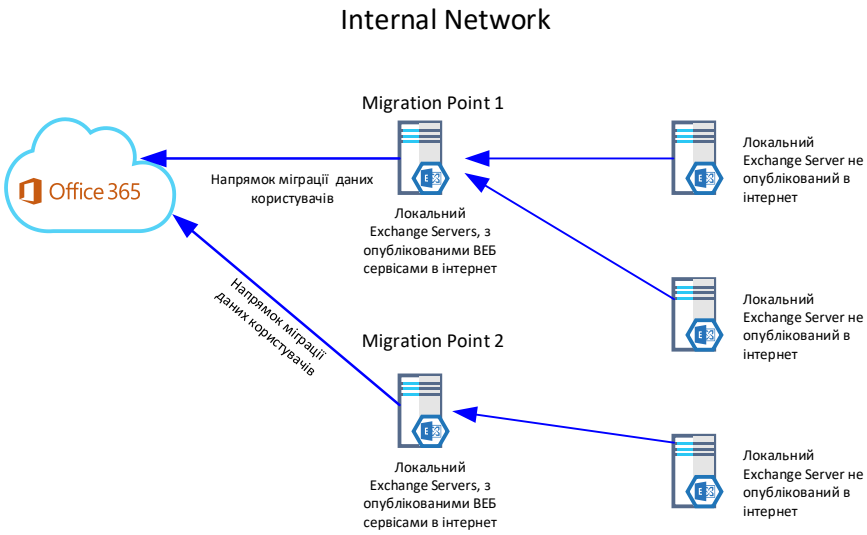


Рис. 4. Міграція даних через різні ЦОДи (варіант «2»)

Отже, на даному етапі необхідно визначитися, яким чином компанії потрібно мігрувати дані і через які центри обробки даних. Для цього необхідно виконати подвійний запит: а) Визначити, який режим міграції планується використовувати (1 або 2) і, якщо вибирається сценарій «2», приступаємо до конфігурації гібридної інфраструктури під формат, в якому поштові скриньки зможуть переноситися через різні ЦОДи з інтелектуальною обробкою того, яким шляхом вони повинні переміщуватись; б) З'ясувати, через який ЦОД буде вестися міграція в разі варіанту «1». Якщо ж буде обраний варіант «2», то тоді в

процесі міграції система сама повинна встановити локацію поштових скриньок і визначити, через який ЦОД їх зручніше мігрувати (на підставі служби Autodiscover). Алгоритм конфігурації, наступний.

1. Здійснюється запит для отримання інформації про всі сайти активного каталогу, в яких є, як мінімум, один Exchange Server і результати запиту формують колекцію сайтів Exchange Server, які також нумеруються.

2. Здійснюється запит по всіх WEB-сервісах всередині локальної поштової організації, щоб отримати тільки ті сервіси, в яких встановлені такі параметри зовнішнього підключення (ExternalUrl). Даний параметр додається в колекцію всіх доступних для організації зовнішніх WEB-підключень. Всі елементи нумеруються.

3. Далі, відповідальний співробітник складає підстановку того, дані з якого AD-сайту, через яке зовнішнє підключення підприємства мають переміщатися. Дана інформація зберігається в спеціальному файлі.

4. Наявність і контент конфігураційного файлу перевіряється при кожному запуску конфігураційного скрипта, який перевіряє його вміст і відображає те, що було вже раніше налаштовано, а якщо файл порожній або відсутній, то просто переконфігуровує його знову.

У разі, якщо підприємство використовує версії Exchange 2010 або 2013, рекомендується створити окремий сайт AD на одну IP-адресу і встановити в ньому додатково Exchange Server, після чого опублікувати його в зовнішній світ і здійснювати міграцію через нього.

Висновки

В процесі розробки системи було взято підхід, який супроводжує всі проекти, пов'язані з міграцією. Тобто, модулі, які запускаються, відповідають тим чи іншим фазам проектної діяльності.

Перший основний компонент відповідає стадії «оцінка даних» системи, яку планують мігрувати. Всі дані, які збираються під час аналізу інфраструктури, а також дані користувачів системи Microsoft Exchange експортуються до файлів на зовнішньому носії у вигляді CSV-файлів, які будуть використовуватись іншими модулями, та у вигляді TXT (можливо, у HTML) для табличного звіту, який може розглядатись персоналом. Модуль обробки даних запускається після того, як збір даних завершено. Модуль збирає інформацію з CSV-файлів і публікує ці дані до хмарної частини гібридної інфраструктури. Також система вміє сама створювати канали передачі даних (Migration Endpoints) та керувати потоками міграційних даних (Migration Batch).

Література

1. Риз Дж. Облачные вычисления / Джордж Риз. – СПб : БХВ Петербург, 2011. – 288 с.

2. Banerjee B. Microsoft Exchange Server PowerShell Essentials. Packt Publishing, 2016. 210 p.

3. Catrinescu V. Essential PowerShell for Office 365: Managing and Automating Skills for Improved Productivity. Paperback, 2018. 234 p.

4. Kegg D., Guilmette A., Mandich L., Fisher E. Microsoft Office 365 Administration Inside Out (Includes Current Book Service), 2nd Edition. MicrosoftPress, 2017. 1040 p.

5. Stanek W. Microsoft Exchange Server 2013 Pocket Consultant Databases, Services, & Management. The Microsoft Press, 2013. 384 p.

6. Connect to Office 365 PowerShell. URL: https://docs.microsoft.com/en-us/office365/enterprise/powershell/connect-to-office-365-powershell

References

1. Reese G. Cloud computing / George Reese. – SPb : BHV Petersburg, 2011. – 288 p.

2. Banerjee B. Microsoft Exchange Server PowerShell Essentials. Packt Publishing, 2016. 210 p.

3. Catrinescu V. Essential PowerShell for Office 365: Managing and Automating Skills for Improved Productivity. Paperback, 2018. 234 p.

4. Kegg D., Guilmette A., Mandich L., Fisher E. Microsoft Office 365 Administration Inside Out (Includes Current Book Service), 2nd Edition. MicrosoftPress, 2017. 1040 p.

5. Stanek W. Microsoft Exchange Server 2013 Pocket Consultant Databases, Services, & Management. The Microsoft Press, 2013. 384 p.

6. Connect to Office 365 PowerShell. URL: https://docs.microsoft.com/en-us/office365/enterprise/powershell/connect-to-office-365-powershell

Надійшла / Paper received : 02.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-106-110
УДК 004.75:336.744

Г.І. РАДЕЛЬЧУК, М.Л. ХОРОШУН
Хмельницький національний університет

КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ПЛАТІЖНОЇ СИСТЕМИ З ВЛАСНОЮ ЦИФРОВОЮ ВАЛЮТОЮ НА БАЗІ БЛОКЧЕЙН-ПЛАТФОРМИ ETHEREUM

У роботі представлено концепції проектування децентралізованої платіжної системи з власною криптовалютою на базі блокчейн-платформи Ethereum. У дослідженні удосконалено метод створення цифрових платіжних засобів шляхом проектування комплексного рішення, яке складається з клієнтської частини та системи розумних контрактів. Обґрунтовано доцільність проектування власної обмінної платформи поряд з інтеграцією зовнішніх криптовалютних бірж для можливості купівлі розробленої криптовалюти за інші популярні цифрові валюти. Удосконалено методи опрацювання транзакцій, що дозволило оптимізувати пропускну здатність системи у порівнянні з існуючими рішеннями. Розглянуто алгоритми функціонування блокчейн-систем та обрано оптимальний алгоритм консенсусу. Результатом дослідження є покращені методи проектування децентралізованих платіжних систем.

Ключові слова: блокчейн, децентралізована платіжна система, цифрова валюта.

GALINA IVANIVNA RADELCHUK, MYKHAILO LEONTIIOVICH KHOROSHUN
Khmelnytskyi National University

CONCEPTS OF DESIGNING A DECENTRALIZED PAYMENT SYSTEM WITH ITS OWN DIGITAL CURRENCY BASED ON THE BLOCKCHAIN PLATFORM ETHEREUM

The study is devoted to the research of design concepts for the development of decentralized payment systems with its own cryptocurrency based on the blockchain platform Ethereum. The study examines the problems associated with traditional models of decentralized payment systems, analyzes the shortcomings in the industry, and proposes approaches to their solution. During the research, the method of creating digital assets was improved by designing a comprehensive solution consisting of a smart contracts part and a web-client part. Also, the expediency of designing its own exchange platform along with the integration of external cryptocurrency exchanges for the possibility of buying developed cryptocurrency for other popular digital currencies was substantiated and visual schemes of the traditional payment system structure with the method of exchange platform integration were presented. The paper substantiates the use of dynamic block size as a method of optimizing system efficiency, which can increase or decrease the maximum block size at the algorithm level, depending on the number of pending transactions, thus providing the required level of bandwidth. Also, the need for one-to-many transfers is justified, which involves the development of new methods of smart contracts for the cryptocurrency transfer from one user to a large number of addresses within a single transaction in order to reduce the load on the network. The problem of high energy consumption required for the functioning of the consensus system in the traditional model was solved by developing a model based on protocols that do not use the computational power of participants as a parameter to maintain consensus. Thus, the results of this study present improved methods for designing decentralized payment systems. The obtained results and generated recommendations can be used in the design of decentralized payment systems.

Keywords: blockchain, decentralized payment system, digital currency.

Вступ. Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку людства гроші втратили товарну сутність і сприймаються лише як розрахункова одиниця. Але еволюція грошей продовжується – паперові гроші перетворюються на цифрові, і все більше виокремлюються децентралізовані платіжні системи як альтернатива центральним банкам. Децентралізовані платіжні системи дозволяють виключити банківську систему з процесу емісії грошей і проведення транзакцій та довірити це комп'ютерним алгоритмам. Такі системи не мають обмежень у формуванні обмінних курсів та здійсненні операцій та дозволяють виконувати вільне переміщення коштів. Транзакції у таких системах не піддаються цензурі та є незворотніми. Поява децентралізованих платіжних систем продемонструвала, що криптовалюти можуть бути ефективним інструментом інвестування. Випуск віртуальної цифрової валюти, яку далі можна використовувати як платіжний засіб усередині сервісу або компанії, виявився найпростішим і найпривабливішим способом як для залучення інвестицій, так і для інвестування. Таким чином, з'явився попит на створення децентралізованих платіжних систем з власними цифровими валютами. Зазвичай, криптовалюта в таких системах виступає в ролі внутрішньої валюти додатку. Однак, методи реалізації подібних систем різняться за показниками ефективності, безпеки коштів та цінністю валюти на глобальному ринку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Криптовалюти − одна з найновітніших технологій у сфері фінансів. Сьогодні наукова спільнота активно проводить дослідження у сфері криптовалютних платіжних систем. Серед робіт на тему криптовалют у першу чергу варто відзначити працю [1], у якій автори детально дослідили більше сотні популярних криптовалют та їхні ключові характеристики, а також ситуацію на ринку криптовалют у цілому та на криптовалютних біржах зокрема. У роботі [2] дослідники розглянули ефективність алгоритму консенсусу Proof-of-Work (PoF), який застосовується у більше ніж 90% сучасних децентралізованих систем. У роботі [3] здійснено ґрунтовний аналіз популярних криптовалют та визначені їхні переваги та недоліки у порівнянні з фіатними валютами.

Виділення невирішених частин загальної проблеми

У передових економіках світу цифрові платіжні системи розвиваються активними темпами, і безумовною перевагою криптовалют є можливість здійснення прямих платежів між користувачами, відсутність національних кордонів для здійснення переказів та зниження операційних витрат у порівнянні з традиційними банківськими системами [4]. Але, окрім внутрішніх витрат за перекази коштів між користувачами мережі для здійснення оплати в криптовалюті, користувачу, який не має її у своєму розпорядженні, необхідно спершу обміняти наявні у нього гроші на криптовалюту, що потребує використання онлайн-бірж або обмінників. Така конвертація валют містить додаткові комісійні витрати. Наприклад, найпопулярніша в Україні онлайн-біржа KUNA встановлює 1,5% комісійних від суми платежу при купівлі криптовалюти за фіатні гроші та 0,25% на обмін криптовалют [5]. При здійсненні платежу у криптовалюті з рахунку на біржі встановлюються фіксовані комісійні. Таким чином, при здійсненні платежів із використанням криптовалют транзакційні витрати всередині децентралізованої платіжної системи можуть бути досить низькими та, враховуючи можливості транскордонного переміщення коштів, більш привабливими у порівнянні із банківськими платежами. Але якщо користувачу необхідно здійснювати обмін або купувати криптовалюту для здійснення такого платежу, то додаткові комісійні витрати можуть перевищувати аналогічні витрати у банківській системі.

Також однією з головних проблем для децентралізованих платіжних систем залишається масштабованість. Наприклад, у рамках протоколу Bitcoin блок транзакцій обмежений розміром в 1 мегабайт і швидкість їх обробки становить приблизно сім операцій в секунду (у той же час Visa обробляє в середньому 2000 операцій за секунду). Розмір блоку впливає на кількість транзакцій, які можна додати у блок. Протокол Bitcoin передбачає, що блок формується в середньому 10 хвилин, і при збільшення активності у мережі збільшуються як комісійні, що пропонуються відправниками, так і час підтвердження окремої транзакції вузлами мережі.

Ще одним важливим моментом при здійсненні платежів є спосіб підтвердження транзакцій. При використанні централізованих банківських платіжних систем банк виступає посередником і гарантом переміщення коштів між рахунками клієнтів. У децентралізованих платіжних системах визначення, чи є транзакція вірною, відбувається на основі консенсусу учасників такої системи (тобто її підтвердження здійснюється «більшістю голосів»). Понад 90% існуючих систем використовують алгоритм консенсусу Proof-of-Work [2]. Суть цього алгоритму зводиться до двох основних пунктів:

- необхідності виконання певного, досить складного і тривалого завдання;
- можливості швидко і легко перевірити результат.

Необхідність постійного розрахунку рішення робить вирішення задачі дуже ресурсномістким, у зв'язку з чим десятки тисяч комп'ютерів витрачають власні обчислювальні ресурси на виконання протоколу консенсусу і при цьому лише один з них наприкінці отримує можливість створити блок. У результаті це призводить до великих енергозатрат, що є проблемою.

Таким чином, проаналізувавши наукові дослідження та публікації, можна зробити висновок, що основними проблемами, пов'язаними з існуючими децентралізованими платіжними системами є наступні: низька швидкість проходження транзакцій; необхідність залучення третьої сторони (криптовалютних бірж) для купівлі/обміну власної криптовалюти; функціонування системи на алгоритмі консенсусу Proof-of-Work, що вимагає значних енергозатрат. Тому основною задачею даного дослідження є покращення методів створення децентралізованих систем задля вирішення існуючих проблем.

Формулювання цілей

Для проведення дослідження сформульовано наступні цілі: провести теоретичний аналіз процедур функціонування децентралізованих платіжних систем; охарактеризувати базову модель організації процесів функціонування децентралізованих платіжних систем; описати існуючі механізми реалізації децентралізованих платіжних систем; виділити наявні проблеми в галузі та описати шляхи їх вирішення; покращити існуючі алгоритми функціонування децентралізованих систем.

Виклад основного матеріалу

Децентралізована платіжна система – цифрова пірингова платіжна система, яка використовує криптовалюту як розрахункову одиницю для обліку операцій. Така комп'ютерна мережа заснована на рівноправ'ї учасників (тобто відсутні виділені сервери), а кожний вузол є як клієнтом, так і виконує функції сервера. На відміну від архітектури «клієнт-сервер» така організація дозволяє зберігати працездатність мережі при будь-якій кількості та будь-якому поєднанні доступних вузлів. Функціонування та захист системи забезпечуються використанням криптографічних методів. При цьому вся інформація про транзакції між адресами системи доступна у відкритому вигляді. Серед популярних децентралізованих платіжних систем можна виділити мережі Bitcoin, Litecoin, Ethereum, Stellar, серед яких найпоширенішою є Ethereum.

Традиційні децентралізовані платіжні системи складаються з двох архітектурних компонентів. Основна логіка роботи системи працює на блокчейн-платформі (наприклад, на розумних контрактах). Для забезпечення зручних інтерфейсів розробляється веб-частина, до складу якої найчастіше входять наступні інструменти: оглядач блоків і транзакцій для показу статистичної та службової інформації про платіжну систему; відділ адміністрування, де здійснюється керування платформою; криптогаманець, за допомогою якого кінцевий користувач здійснює операції надсилання криптовалютних коштів чи отримує інформацію про їх отримання.

При такій формі організації системи існує очевидна проблема − після закінчення емітування монет у мережі користувачі можуть отримати криптовалюту, лише купивши її в інших учасників системи або на криптовалютних біржах. Це призводить до появи небажаних комісій та додаткових ризиків для користувачів, які вимушені користуватись сторонніми додатками для придбання криптовалюти. Рішенням цієї проблеми може стати розробка власної обмінної платформи у комплексі однієї платіжної системи. Таким чином, користувач матиме вибір − здійснювати переказ через зовнішні біржі на ринку чи скористатись офіційною обмінною платформою. В той час, як на офіційній обмінній платформі ціна на криптовалюту буде вищою за ринкову, користувачі, які нею користуватимуться, будуть впевнені у безпеці проведення своїх операцій, оскільки їм не потрібно покладатись на сторонні платформи. На рис. 1 наочно продемонстровано схему платформи і те, як компонент обмінної системи інтегрується в неї.

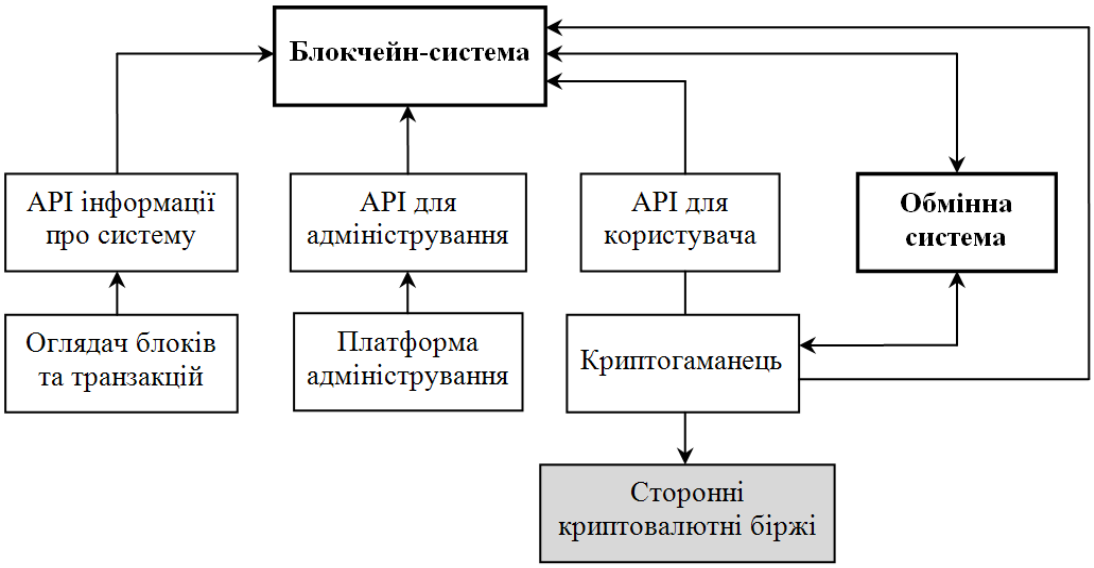


Рис. 1. Взаємодія компонентів системи

Розглянемо детальніше компоненти на представленій схемі. Очевидно, що основним її компонентом є блокчейн-система, яку використовують інші частини платформи для виконання операцій. Блокчейн-система реалізовує головний функціонал системи − збереження даних про криптовалюту та користувацькі рахунки, емітування монет, опрацювання переказів між користувачами. Інші компоненти системи лише звертаються до методів розумних контрактів для отримання даних чи для виконання певних операцій.

В той час, як операції для отримання даних з блокчейну відбуваються за допомогою звичайних методів читання бази даних смарт-контрактів (які миттєво повертають результат), виконання операцій на модифікацію існуючих даних (таких, наприклад, як перекази між рахунками) відбуваються за визначеним алгоритмом (рис. 2). Всі транзакції у системі зберігаються у спеціальних структурах даних − блоках. Під час роботи системи через деякий визначений часовий інтервал у блокчейн додається новий блок. Цей блок може бути порожнім або містити інформацію про деяку кількість транзакцій, обмежену розміром блоку. Кожний наступний блок зберігає посилання на попередній, формуючи таким чином єдиний нерозривний ланцюг. При додаванні нового блоку до ланцюга, транзакції, що містяться в ньому, почергово виконуються на розумних контрактах.

Очевидно, що з таким алгоритмом опрацювання транзакцій неможливо здійснювати горизонтальне масштабування системи. Незважаючи на те, що блокчейн є розподіленою системою, у підсумкову базу даних записується лише один блок, від одного вузла, тому що опрацювання блоків може здійснювати лише один канал обслуговування. Оскільки збільшення кількості каналів обробки є неможливим, то для підвищення пропускної здатності системи у роботі запропоновані наступні методи оптимізації.

1 Використання динамічного розміру блоку. Кожний блок у системі має фактичний та максимальний розмір. Фактичний розмір блоку відповідає об'єму транзакцій, які в ньому знаходяться. Максимальний розмір блоку відповідає максимальному значенню сукупного розміру транзакцій, які можуть розміститися в ньому, та визначається системою під час її старту. Передбачивши можливість збільшення максимального розміру блоку вже після запуску мережі, можна масштабувати пропускну здатність системи: при збільшенні навантаження на систему значення максимального розміру блоку буде зростати, а при зменшенні навантаження − зменшуватись. Таким чином, з'явиться змога опрацьовувати більшу кількість транзакцій за той самий часовий період. Реалізація цього функціоналу полягатиме у підтриманні консенсусної зміни конфігурацій. Створювачу блоків має бути надана можливість змінювати максимальний розмір для свого блоку, але не більше ніж на 1% від розміру попереднього блоку. Таким чином, значення максимального розміру блоку в системі відповідатиме навантаженню на систему.

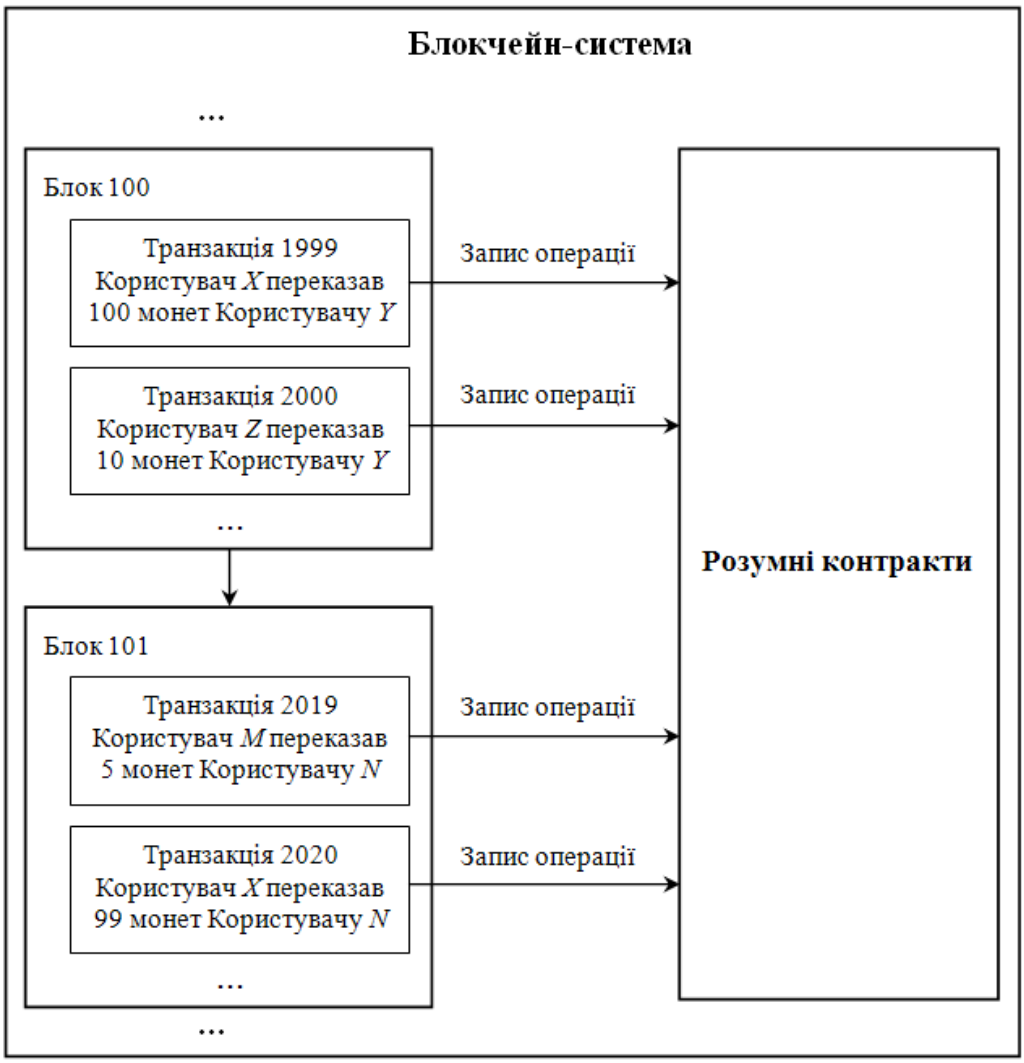


Рис. 2. Опрацювання транзакцій всередині блокчейн-системи

2 Перекази «один до багатьох». Також для того, щоб зменшити навантаження на мережу, доцільно розробити функціонал виклику трансферу криптовалюти, при якому в якості вхідних аргументів методу смарт- контракту можна було б передати список адрес отримувачів та необхідні суми переказу кожному з отримувачів. Таким чином, при здійсненні переказу на значну кількість адрес, користувач зможе це зробити всередині лише однієї транзакції, що зменшить навантаження на мережу.

У процесі застосування технології блокчейн виникає також питання підбору ефективного протоколу консенсусу. Консенсус блокчейна полягає в тому, що всі вузли підтримують однаковий розподілений реєстр. У традиційній архітектурі програмного забезпечення це не є проблемою через існування центрального сервера, з яким узгоджуються інші вузли. Однак, у розподіленій мережі (такій як блокчейн) кожен вузол є і хостом, і сервером, і, щоб досягти консенсусу, йому потрібно обмінюватися інформацією з іншими вузлами. Інколи деякі вузли можуть працювати у режимі офлайн. Окрім того, можуть з'явитись деякі шкідливі вузли, які будуть негативно впливати на процес консенсусу і, навіть, можуть зашкодити йому. Тому потрібен протокол, який не допустить виникнення подібних ситуацій та мінімізує негативний вплив шкідливих вузлів таким чином, щоб вони не впливали на кінцевий результат консенсусу.

Аналіз предметної області показав, що близько 90% існуючих децентралізованих систем використовують алгоритм консенсусу Proof-of-Work. Однак, значним недоліком PoW-алгоритму є те, що його функціонування потребує постійних значних затрат електроенергії на процес створення блоків. Цей недолік яскраво видно на прикладі Біткоіна, який реалізовує вказаний алгоритм. За один рік на функціонування мережі витрачається більше електроенергії, ніж використовує Швейцарія за цей же період. Проблему значних енергозатрат можна вирішити шляхом розробки моделі на основі протоколів, що не використовують обчислювальну здатність учасників як параметр підтримання консенсусу. У роботі [6] автори здійснили порівняльний аналіз найпопулярніших алгоритмів консенсусу, розглянувши методи обчислення значень основних характеристик алгоритмів: відмовостійкість, ресурсоємність, масштабованість та придатність для публічних мереж. На основі результатів цього аналізу сформовано порівняльну таблицю 1.

Таблиця 1

Характеристика різних алгоритмів консенсусу

Характеристика	PoW	PoS	PBFT	Ripple
Тип алгоритму	Ймовірнісно-кінцевий	Ймовірнісно-кінцевий	Абсолютної остаточності	Абсолютної остаточності
Відмовостійкість	50%	50%	33%	20%
Ресурсоємність	Висока	Середня	Низька	Низька
Масштабованість	Добра	Добра	Погана	Погана
Придатність для публічних мереж	Придатний	Придатний	Не придатний	Придатний

Як бачимо з табл. 1, серед алгоритмів, придатних для публічної мережі, алгоритми PoW і PoS (Proof of Stake) відрізняються лише за показником ресурсоємності. При цьому PoS набагато менш ресурсоємний, тому він є кращим вибором для публічного блокчейну. Вибір цього алгоритму консенсу для системи дозволить зменшити її ресурсоємність та забезпечить необхідними інструментами персоналізації.

Висновки

Таким чином, у роботі досліджено процедури залучення криптовалютних інвестицій, охарактеризовано структуру предметної області та виділено основні невирішені проблеми. Розглянуто та описано моделі, за якими працюють традиційні децентралізовані платіжні системи. Запропоновано методи та рішення, які дозволять оптимізувати їхню роботу: підвищити швидкість проходження транзакцій; забезпечити відсутність необхідності залучення «третьої» сторони (сторонніх криптовалютних бірж) для купівлі/продажу власної криптовалюти; оптимізувати використання енергозатрат для підтримки функціонування системи шляхом вибору та застосування ефективного алгоритму консенсусу.

Література

1. Hileman G. Global cryptocurrency benchmarking study / G. Hileman, M. Rauchs. – Cambridge, 2017. – 114 p.

2. Gervais A. On the Security and Performance of Proof of Work Blockchains / A. Gervais, G. Karame, K. Wüst etc. // CCS '16: Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. – 2016. – № 10. – P. 3–16.

3. Dorofeyev M. Trends and Prospects for the Development of Blockchain and Cryptocurrencies in the Digital Economy / M. Dorofeyev, M. Ksov, V. Ponkratov // European Research Studies Journal. – 2018. – № 21. – P. 429–445.

4. Олешко А. А. Інноваційні тенденції розвитку безготівкової економіки / А. А. Олешко // Інвестиції: практика та досвід. – 2018. – № 10. – С. 22–25.

5. Бойко В. П. Переваги та недоліки використання децентралізованих платіжних систем як інноваційного способу транскордонних розрахунків / В. П. Бойко // Інвестиції: практика та досвід. – 2019. – № 8. – С. 75–82.

6. Золотарьова І. О. Інформаційні технології оптимізації роботи приватного блокчейн за допомогою вибору алгоритму консенсусу / І. О. Золотарьова, Г. О. Плеханова // Системи обробки інформації. – 2020. – № 1. – С. 107–114.

References

1. Hileman G. Global cryptocurrency benchmarking study / G. Hileman, M. Rauchs. – Cambridge, 2017. – 114 p.

2. Gervais A. On the Security and Performance of Proof of Work Blockchains / A. Gervais, G. Karame, K. Wüst etc. // CCS '16: Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. – 2016. – № 10. – P. 3–16.

3. Dorofeyev M. Trends and Prospects for the Development of Blockchain and Cryptocurrencies in the Digital Economy / M. Dorofeyev, M. Ksov, V. Ponkratov etc. // European Research Studies Journal. – 2018. – № 21. – P. 429–445.

4. Oleshko A. A. Innovatsiyni tendentsiyi rozvytku bezhotivkovoyi ekonomiky / A. A. Oleshko // Investytsiyi: praktyka ta dosvid. – 2018. – № 10. – S. 22–25.

5. Boyko V. P. Perevahy ta nedoliky vykorystannya detsentralizovanykh platizhnykh system yak innovatsiynoho sposobu transkordonnykh rozrakhunkiv / V. P. Boyko // Investytsiyi: praktyka ta dosvid. – 2019. – № 8. – S. 75–82.

6. Zolotar'ova I. O. Informatsiyni tekhnolohiyi optymizatsiyi roboty pryvatnoho blokcheyn za dopomohoyu vyboru alhorytmu konsensusu / I. O. Zolotar'ova, H. O. Plekhanova // Systemy obrobky informatsiyi. – 2020. – № 1. – S. 107–114.

Надійшла / Paper received : 17.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-111-119
УДК 004.9

О.М. ЯШИНА, О.А. КРАВЧУК
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ, АРХІТЕКТУРНИЙ СТИЛЬ REST ТА ЇХ СУЧАСНА РЕАЛІЗАЦІЯ НА JAVA

В статті наведено результати дослідження мікросервісної архітектури, наведені її переваги та недоліки, проведено її порівняння з загальноприйнятим підходом до розробки програмного забезпечення, описаний архітектурний підхід REST, який найчастіше використовують з досліджуваною архітектурою. Реалізована програма на Java є прикладом дотримання визначених понять за допомогою сучасних інструментів розробки.

Ключові слова: мікросервісна архітектура, REST, Java.

O.M. YASHYNA, O.A. KRAVCHUK
Khmelnytskyi national University

RESEARCH OF MICROSERVICE ARCHITECTURE, REST ARCHITECTURAL STYLE AND THEIR MODERN IMPLEMENTATION ON JAVA

Software architecture is a set of important decisions about the organization of the software system. The success and speed of the project development, the complexity of its support and understanding of the program structure depends on the correct choice of software architecture. For this reason, developers often use new architectural solutions to build software, trying to find the best solutions to a problem. The common practice of program development was the development on the principle of monolithic architecture, which envisages the project as a single program, which is responsible for all necessary functionality. Of course, this approach had its advantages, such as ease of development, testing and deploying. But with project`s growth, the monolithic architecture begins to make some flaws in the development process: the addition of a certain new functionality is accompanied by an increase in the code base, observance of limits of responsibility of internal modules is blurred, compiling and deploying takes much more time. Given the drawbacks of monolithic architecture above, developers have begun to take other approaches. One is microservice architecture. Microservice Architecture - A variant of service architecture (modular software development approach) software, focused on the interaction of as small as possible, loosely coupled and easily replaceable modules – microservices [1]. With such an architecture, the project is a set of small services, the communication between which is done through lightweight mechanisms (for example, HTTP, which can be used in REST architectural style to get an increased productivity and simplified architecture) [2]. Each of these services must fulfil its clearly defined business task. This architecture has the following advantages: better scaling, independent module development and deploying, better reusability etc.

Keywords: microservice architecture, REST, Java

Постановка проблеми

Архітектура програмного забезпечення є сукупністю важливих рішень про організацію програмної системи. Від правильного вибору архітектури залежить успішність та швидкість розробки проєкту, складність його підтримки та розуміння структури програми. Саме через це розробники часто використовують нові архітектурні рішення для побудови програмного забезпечення, намагаючись знайти оптимальні варіанти вирішення тієї чи іншої проблеми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Методологічною основою нашого дослідження стали праці таких дослідників як Кріс Річардсон, Мартін Фаулер, Рой Філдінг, Філ Кальчадо та багато інших. Загалом ці дослідники описують REST, мікросервісну архітектуру, її переваги та недоліки над іншими, а також застосування її кращих сторін на практиці.

Формулювання цілей статті

Метою статті є визначення переваг та недоліків мікросервісної архітектури, визначення поняття архітектурного стилю REST та створення програми на Java за допомогою вище вказаних підходів.

Виклад основного матеріалу

Загальноприйнятою практикою розробки програм була розробка за принципом монолітної архітектури, яка передбачає проєкт як одну програму, яка відповідає за весь необхідний функціонал. І, безумовно, такий підхід мав свої переваги:

- простота розробки – IDE (середовище розробки) та інші інструменти для створення програмного забезпечення сфокусовані на побудові проєкту як одного цілого;
- легкість тестування – проєкт легше тестується, коли весь функціонал знаходиться в одній програмі;
- простота розгортання – проєкт легко розгорнути, оскільки він складається з одного файлу (наприклад, WAR, JAR тощо).

Але, при розвитку та збільшенні проєкту, монолітна архітектура розпочинає вносити певні недоліки в процес розробки:

- додавання певного нового функціоналу супроводжується наростанням кодової бази;
- швидкість розробки сповільнюється через необхідність внесення змін в одну велику систему;
- дотримання границь відповідальності внутрішніх модулів розмивається;
- будь-яка зміна проєкту вимагає його перекомпіляції;
- компіляція, збирання та розгортання програми займає більше часу;

- розуміння проєкту та його архітектури ускладнюються через збільшення його розмірів, новим розробникам потрібно більше часу для інтеграції.

Враховуючи вище наведені недоліки монолітної архітектури, розробники почали використовувати інші підходи. Одним із них є мікросервісна архітектура.

Мікросервісна архітектура – варіант сервісної архітектури (модульний підхід ро розробки програм) програмного забезпечення, орієнтований на взаємодію максимально, наскільки це можливо, невеликих, слабо пов'язаних і легко замінних модулів – мікросервісів [1]. При такій архітектурі проєкт являє собою набір невеликих сервісів, комунікація між якими відбувається за допомогою легких механізмів (наприклад, HTTP) [2]. Кожен з таких сервісів повинен виконувати свою чітко визначену бізнес-задачу. Розглянемо різницю монолітної та мікросервісної архітектури на рисунку, наведеному нижче (рис. 1):

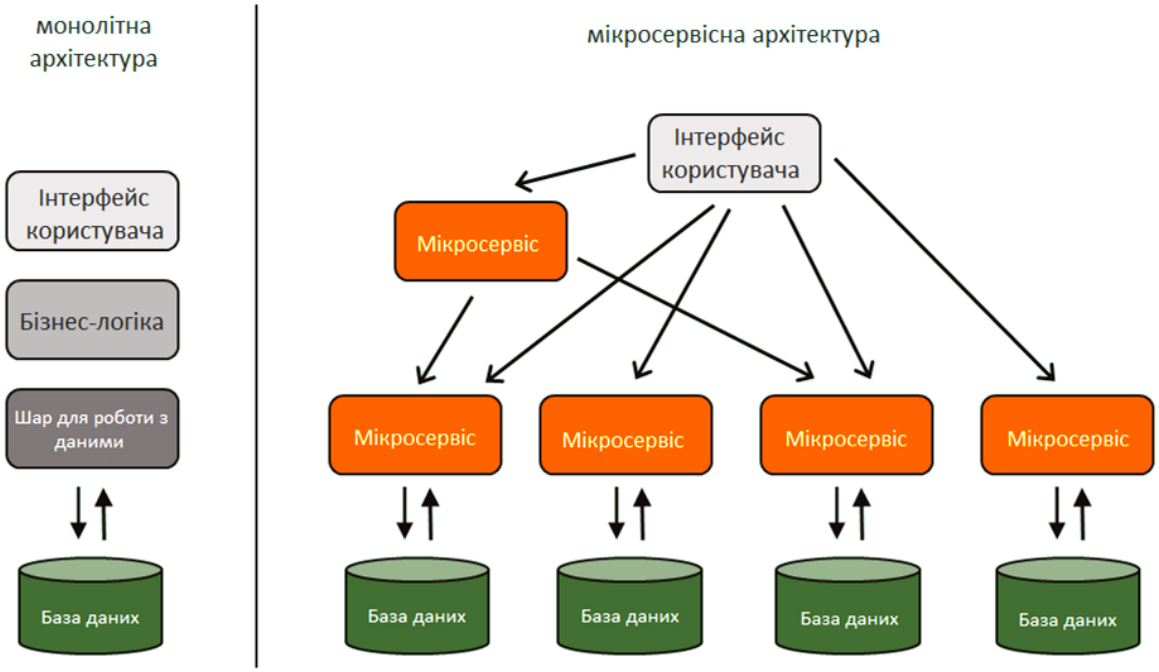


Рис. 1. Монолітна та мікросервісна архітектури

Серед переваг такої архітектури можна виділити наступні [3]:

- незалежна розробка – невеликі за розмірами незалежні компоненти можуть створюватися малими незалежними командами розробників. Група розробників може працювати над змінами/розробкою одного сервісу, не змінюючи і навіть не знаючи про інший сервіс. Кількість часу, необхідна на вивчення сервісу значно зменшується, і реалізовувати нові функції стає значно простіше;
- незалежне розгортання – кожен окремий компонент проєкту можна запускати незалежно від інших. Це дозволяє випускати новий функціонал швидше і з меншими ризиками. Виправляючи помилки в одному сервісі, його можна перезапускати без необхідності перезапускати інші сервіси;
- незалежне масштабування – кожен сервіс можна масштабувати незалежно від іншого. Наприклад, випускаючи новий функціонал, для збільшеного навантаження на сервери можна відмасштабувати лише сервіси, які будуть використовуватися користувачами активніше. Це дозволяє зменшити витрати та виконувати масштабування гнучкіше, ніж при монолітній архітектурі. Також, для кожного сервісу можна підібрати найкращу конфігурацію ресурсів (пам'яті, процесора тощо), в той час як монолітна система буде працювати на одному комп'ютері;
- можливість повторного використання – кожен компонент реалізує свою чітко визначену бізнес-задачу. За рахунок цього, кожен сервіс можна використовувати в інших проєктах, виконуючи менше змін для адаптації;
- краща ізоляція неполадок – в мікросервісній архітектурі краще ізольовані неполадки. Наприклад, витік пам'яті в одного сервіса вплине лише на нього, в той час як інші сервіси продовжать працювати в звичайному режимі. В монолітній архітектурі така проблема виведе з роботи всю систему;
- краща здатність до залучення нових технологій – кожен сервіс може використовувати інший набір технологій, іншу мову розробки тощо. Якщо в випадку невдалого використання технології в мікросервісній архітектурі необхідно змінити лише компоненти, які використовують цю технологію, в монолітній системі необхідно буде переписувати всю програму.

Однак, при всіх позитивних моментах, мікросервісна архітектура має також недоліки:

- збільшена складність для розробників – якщо розробнику необхідно виконати завдання, яке пов'язане з декількома сервісами, зазвичай це збільшує складність розробки, оскільки йому необхідно буде конфігурувати та запускати ці декілька сервісів на своєму комп'ютері, що є важчим ніж запуск однієї програми;

- складність розподілених систем – у випадку взаємодії декількох сервісів необхідно бути готовим до часткових збоїв, високої латентності та недоступності інших віддалених сервісів;
- складність тестування – зростає складність у написанні автоматичних інтеграційних тестів, оскільки система складається з незалежних між собою сервісів;
- зростання складності експлуатації – команді, яка займається експлуатацією та підтриманням сервісів у робочому стані буде важче виконувати свої обов'язки. Замість однієї програми необхідно буде контролювати певну кількість сервісів, і чим їх більше, тим більша кількість потенційних проблемних місць;
- необхідна серйозна компетентність – розробка проєкту за допомогою мікросервісної архітектури може дати продуктивні результати, якщо роботу виконували професіонали. Однак, маючи низький рівень освіченості, розробка таких проєктів може привести до заплутаності в організації сервісів та неефективності результату роботи;
- необхідність встановлення чітких границь – для кожного сервісу повинні бути визначені чіткі границі його бізнес-задачі. Якщо цього не буде зроблено, тоді залежності між сервісами будуть зростати, що може привести до того, що через ці самі залежності необхідно буде запускати певні сервіси як одну єдину групу, де один сервіс не може функціонувати без іншого. В такому випадку систему можна назвати розподіленим монолітом.

Зважаючи на такі недоліки може виникнути питання, чи варто взагалі переходити від звичної монолітної архітектури на мікросервіси? У відповідь на це, розглянемо рішення відомих компаній [4]:

- Amazon - "Якщо повернутися до 2001 року, веб-сайт Amazon.com був великим архітектурним монолітом", - Боб Брігхем, спікер від Amazon на конференції Amazon's: Invent 2015. Тоді Amazon боровся з управлінням своєї швидко зростаючої популярності та важливості в Інтернеті. Брігхем також пояснив, що компанія "зауважила, що потрібен тривалий час, щоб зміна коду перейшла від реалізації розробників до запуску у виробництво, де клієнти могли її використовувати". На сьогоднішній день Amazon є одним з найбільших прихильників мікросервісів, допомагаючи іншим компаніям з запуском, керуванням та аналізом бізнес-рішень у вигляді мікросервісів за допомогою Amazon Web Services (AWS);
- Netflix – У 2009 році Netflix прийняв рішення про розподіл моноліту на мікросервіси, коли їх розробки з монолітною архітектурою спричинили проблеми на шляху зростання технологічного гіганта. Також, попередня архітектура приводила до регулярних відключень серверів. Прийняття мікросервісної архітектури було одним із факторів, що призвели до феноменального зростання Netflix. Сьогодні ця компанія є одним з найвідоміших прикладів успішного застосування даної архітектури;
- Sound cloud – На сьогоднішній день, на цю платформу завантажується близько 12 годин музики та звуку щохвилини, їх сервіси використовують сотні мільйонів людей щодня. Щоб масштабувати свій проєкт, компанія розробила та опублікувала декілька компонентів та інструментів, які допомагають запускати міграцію баз даних у потрібному масштабі, провела серйозний аналіз щодо того, як фреймворк, на якому був написаний проєкт, отримує доступ до баз даних та обробляє величезну кількість повідомлень. Врешті-решт компанія вирішила кардинально змінити спосіб розробки проєктів, оскільки команда "відчувала, що завжди латала систему, та не вирішувала основної проблеми масштабування" [5]. Таким чином, вирішуючи цю проблему компанія перейшла до мікросервісної архітектури.

Тепер розглянемо не менш важливий чинник успішності проєкту з такою архітектурою – передача даних. Оскільки проєкт з мікросервісною архітектурою складається з певної кількості окремих сервісів, вони повинні між собою реалізовувати механізм передачі інформації. На сьогоднішній день найбільш широко для цієї мети використовується підхід REST.

REST (Representational state transfer) – архітектурний стиль взаємодії компонентів розподіленого програмного забезпечення в мережі [6]. Як правило, такий підхід використовується для побудови веб-сервісів. REST являє собою набір погоджених обмежень, при дотриманні яких підвищується продуктивність та спрощується архітектура. Системи, які підтримують цей підхід називаються RESTful-системами. Щоб система вважалась сконструйованою в цьому архітектурному стилі, вона повинна задовольняти наступні критерії:

- Client-Server. Система повинна бути розділена на клієнтів і на серверів. Поділ інтерфейсів означає, що, наприклад, клієнти не пов'язані зі зберіганням даних, яке залишається всередині кожного сервера, так що мобільність коду клієнта поліпшується. Сервери не пов'язані з інтерфейсом користувача або станом, так що сервери можуть бути простішими і більш масштабованими. Сервери та клієнти можуть бути замінні і розроблятися незалежно, допоки інтерфейс не змінюється.
- Stateless. Сервер не повинен зберігати будь-яку інформацію про клієнтів. У запиті повинна зберігатися вся необхідна інформація для обробки запиту і якщо необхідно, ідентифікації клієнта. Стан сесії при цьому зберігається на стороні клієнта. Інформація про стан сесії може бути передана сервером будь-якому іншому сервісу (наприклад, в службу бази даних) для підтримки стійкого стану користувача.
- Cache. Кожна відповідь повинна бути зазначена чи є він кешованою чи ні, для запобігання повторного використання клієнтами застарілих або некоректних даних у відповідь на подальші запити.
- Uniform Interface. Визначається єдиний інтерфейс між клієнтами і серверами. Це спрощує і відокремлює архітектуру, яка дозволяє кожній частині розвиватися самостійно. Щоб задовольняти цей критерій, необхідно виконувати наступні 4 умови:

1) ідентифікація ресурсів – кожен ресурс (користувач, товар тощо) в REST повинен бути

ідентифікованийза допомогою стабільного ідентифікатора, який не зміниться при зміні стану ресурса. Наприклад, таким ідентифікатором може виступати URI (Uniform Resource Identifier, ідентифікатор ресурса);

2) маніпуляція ресурсами через представлення – якщо клієнт зберігає представлення ресурса, то він може його змінити чи видалити;

3) само-описувані повідомлення – кожне повідомлення повинно містити в собі достатньо інформації, щоб було зрозуміло, як його обробити;

4) HATEOAS (гіпермедіа як засіб зміни стану додатка) - Статус ресурсу передається через вміст тіла запиту, параметри рядка запиту, заголовки запитів і запитуваний URI. Це називається гіпермедіа (або гіперпосилання з гіпертекстом).

- Шарування системи – клієнт зазвичай не здатний точно визначити, взаємодіє він безпосередньо з сервером або ж з проміжним вузлом, в зв'язку з ієрархічною структурою мереж (маючи на увазі, що така структура утворює шари). Застосування проміжних серверів здатне підвищити масштабованість за рахунок балансування навантаження і розподіленого кешування. Кожен компонент системи може бачити лише компонент наступного шару. Наприклад, якщо клієнт хоче отримати відео з сервісу, який в свою чергу отримує його з віддаленого репозиторія, то клієнт нічого не повинен знати про віддалений репозиторій.

Також варто розуміти, що підхід REST не прив’язаний до конкретних технологій та протоколів, однак на практиці майже завжди використовуючи цей підхід передбачається використання HTTP протоколу.

HTTP (англ. HyperText Transfer Protocol – «протокол передачі гіпертексту») – протокол прикладного рівня передачі даних. Спочатку дані передавались лише у вигляді гіпертекстових документів в форматі «HTML» [7]. На сьогоднішній день цей протокол використовується для передачі довільних даних. Основою HTTP є технологія «клієнт-сервер», для якої є необхідне існування клієнта, який буде ініціювати з’єднання і відправляти запит, і сервера, який очікує новий запит, виконує певні дії та надсилає відповідь з результатом.

Основним об'єктом маніпуляції в HTTP є ресурс, на який вказує URI в запиті клієнта. Зазвичай такими ресурсами є файли, що зберігаються на сервері, але ними можуть бути і інші логічні об’єкти (наприклад, записи в базі даних).

Розглянемо структуру повідомлення, яке клієнт відсилає серверу. Воно складається з трьох частин:

- стартова стрічка – визначає тип повідомлення. У собі містить метод, який визначає тип запиту, URI, який є адресом до якого буде надісланий запит, та версія протоколу HTTP;
- заголовки – інформація, яка характеризує тіло повідомлення, описує його формат тощо;
- тіло запиту – частина повідомлення, у якій безпосередньо містяться дані, які необхідно передати. Не є обов’язковою частиною запиту.
- Для взаємодії з сервером з архітектурним підходом REST зазвичай використовують наступні 4 методи:
- GET – використовується для запиту вмісту заданого ресурсу. За допомогою цього методу також можна розпочати якийсь процес. При використанні цього метода можна використовувати параметри, які додаються до URI після знаку ‘?’.
- POST – використовується для передачі даних користувача вказаній адресі. Зазвичай, використовується для додавання нових об’єктів/ресурсів (наприклад, новий коментар, товар, замовлення тощо).
- PUT – використовується для завантаження вмісту запита на вказаний URI. Різниця між цим методом і POST полягає в тому, що URI ресурс в випадку POST запиту буде оброблювати дані, передані клієнтом, в той час як з методом PUT клієнт передбачає, що завантажуваний вміст вже відповідає тому, що знаходиться за даним URI ресурсу. Зазвичай використовується для оновлення об’єктів/ресурсів.
- DELETE – слугує для видалення ресурсу.

Працюючи з базами даних, легко поставити у відповідність чотирьом базовим функціям для роботи з базою даних (CRUD – create, read, update, delete) методи HTTP протоколу, які використовуються у REST: create - POST, read-GET, update - PUT та delete-DELETE. Також, говорячи про HTTP, варто відзначити популярні формати передачі інформації в тілі запита. На сьогодні, є два основні формати: XML та JSON.

XML (Extensible Markup Language) – розширювана мова розмітки, запропонована як стандарт побудови мов розмітки ієрархічно структурованих даних для обміну між різними застосунками, зокрема, через Інтернет. XML розроблялась як мова з простим формальним синтаксисом, зручним для створення і обробки документів програмами і одночасно зручним для читання і створення документів людиною. Розширення XML – це конкретна граматика, створена на базі XML і представлена словником тегів і їх атрибутів, а також набором правил, що визначають які атрибути і елементи можуть входити до складу інших елементів.

JSON (JavaScript Object Notation) – текстовий формат обміну даними, заснований на JavaScript. Як і багато інших текстові форматів, JSON легко читається людьми. За рахунок своєї лаконічності в порівнянні з XML, формат JSON може бути більш підходящим для серіалізації складних структур. Застосовується в веб-додатках як для обміну даними між клієнтом і сервером, так і між серверами.

Розглянемо приклад одного й того самого списку студентів у описаних вище форматах:

Як видно, формат JSON є набагато простішим для сприйняття та розуміння ніж XML. Це є однією з причин, чому він поступово витісняє свого конкурента з ринку.

XML

```
 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<students>
      <student>
         <Ім`я>Андрій</Імя>
         <Прізвище>Мельник</Прізвище>
      </student>
      <student>
         <Ім`я>Василь</Імя>
         <Прізвище>Ломаченко</Прізвище>
      </student>
      <student>
         <Ім`я>Олександр</Імя>
         <Прізвище>Усик</Прізвище>
      </student>
</students>
```

JSON

```
{"students":[
  { "Ім`я":"Андрій", "Прізвище":"Мельник" },
  { "Ім`я":"Василь", "Прізвище":"Ломаченко" },
  { "Ім`я":"Олександр", "Прізвище":"Усик" }
]}
```

Перейдемо до розробки показового сервісу, який притримується обмежень стилю REST. Побудуємо простий мікросервіс, який буде виконувати CRUD операції над об'єктами User (створимо таблицю в базі даних, яка буде зберігати наші записи). Для передачі даних будемо використовувати протокол HTTP, формат даних JSON (як було показано вище, він є легшим для розуміння ніж XML).

Створювати програму будемо на мові Java, оскільки вона містить велику кількість інструментів для швидкої розробки програмного забезпечення. Одним з таких інструментів є Spring Framework - універсальний фреймворк з відкритим кодом для Java-платформ, який дозволяє легко та швидко створювати додатки в стилі REST. Підключити його до проєкту можна за допомогою спеціальних інструментів, таких як Gradle або Maven. За допомогою цього фреймворку ми створимо клас-контролер UserController, який буде приймати HTTP-запити, та передавати інформацію з запиту у клас-сервіс UserService. В класі-сервісі в залежності від обраного методу та переданих параметрів будуть виконуватись певні дії над даними, які будуть представлені у вигляді об'єктів класу User, які зберігаються в базі даних. Підключення та робота з базою даних буде реалізована за допомогою інтерфейсу UserRepository. Після того, як UserService виконає роботу він поверне результат у контролер, який в свою чергу поверне його користувачу. При запуску програми, виконувати HTTP-запити необхідно виконувати на адрес localhost:8080 (localhost у випадку локального звернення до сервісу, 8080-стандартний порт на якому Spring запускає програму)

Створимо в базі даних таблицю user з полями id, email, name, number (за допомогою MySQL Workbench, рис. 2):

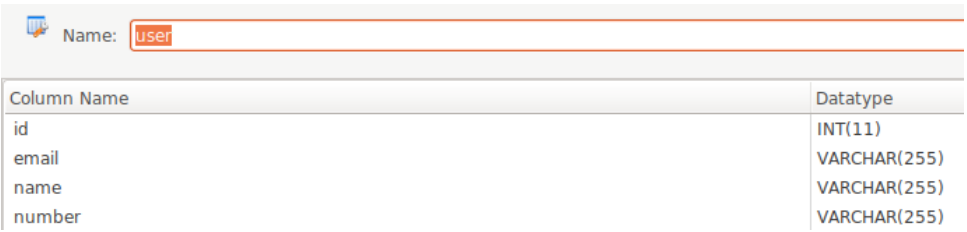


Рис. 2. Структура таблиці user

Перейдемо до створення класів, які є необхідними для роботи додатку. Імпорти функцій, класів, конструктори, методи get/set для полів класів не включені в наведений нижче код задля більшої компактності коду. Клас User виглядає наступним чином:

```
@Entity
@Table(name="user")
public class User {
        @Id
        @GeneratedValue(strategy = GenerationType.IDENTITY)
        private Integer id;
        private String name;
        private String number;
        private String email;
}
```

Анотація @Entity вказує, що цей об'єкт буде використаний як репрезентація об'єкта з бази даних. @Table з параметром name вказує назву таблиці, з якою об'єкт буде пов'язаний. Анотації @Id та @GeneratedValue (strategy = GenerationType.*IDENTITY*) вказують, що поле Integer id є ідентифікатором у базі

даних, який генерується автоматично на стороні БД. Окрім id, клас містить поля, які відповідають полям таблиці в базі даних.

Інтерфейс UserRepository:

```
public interface UserRepository extends CrudRepository<User, Integer> {
}
```

Наслідування класу CrudRepository – єдине, що необхідно для з'єднання з базою даних. Всю роботу за нас виконує Spring за допомогою наслідуваного класу. Generics типи для класу, який ми наслідуємо, визначають яким класом ми будемо репрезентувати записи з бази даних (User), а також якого типу в цього класу буде ідентифікатор (Integer).

Клас UserService:

```
@Service
public class UserService {
	@Autowired
	private UserRepository userRepository;
	public User update(User newUser, Integer id) {
		return save(newUser, id);
	}
	public User save(User newUser) {
		return save(newUser, newUser.getId());
	}
	private User save(User newUser, Integer id) {
		newUser.setId(id);
		return userRepository.save(newUser);
	}
	public User getUser(Integer id) {
		Optional<User> optionalUser = userRepository.findById(id);
		return optionalUser.orElse(null);
	}
	public void deleteUser(Integer id) {
		userRepository.deleteById(id); }}
```

Анотація @Service позначає, що клас UserService є серівс-компонентом програми, ініціалізація якого в інших класах буде реалізовуватись фреймворком. @Autowired над екземпляром інтерфейса UserRepository дозволяє віддати його вчасну ініціалізацію під контроль фреймворка. Назва кожного методу відповідає бізнес-задачі, яку він виконує. Методи save та update приймають як параметр об'єкт-користувача, якого необхідно зберегти або оновити. Методи getUser та deleteUser слугують для отримання та видалення користувача за його id, який передається як параметр у ці методи.

Клас UserController виглядає наступним чином:

```
@RestController
@RequestMapping(path = "/user")
public class UserController {

	@Autowired
	private UserService userService;

	@GetMapping(path = "/{id}")
	public User get(@PathVariable Integer id) {
		return UserTransformer.transform(userService.getUser(id));
	}

	@PostMapping
	public User add(@RequestBody User user) {
		return userService.save(user);
	}

	@PutMapping(path = "/{id}")
	public User update(@RequestBody User user, @PathVariable Integer id) {
		return userService.update(user, id);
	}

	@DeleteMapping(path = "/delete/{id}")
	public void delete(@PathVariable Integer id) {
		userService.deleteUser(id);
	}
}
```

Анотація @RestController дає знати фреймворку, що цей клас є контролером, який буде очікувати HTTP-запити та обробляти їх. @RequestMapping(path = "/user") визначає шлях URI до методів цього контролера (за допомогою значення, присвоєного аргументу path). Тобто, щоб виконати запит до одного з

методів цього контролера, необхідно до адреси додати префікс /user. Наприклад, при локальному підключенні URI до цього контролера буде наступним: localhost:8080/user . Анотації @GetMapping, @PostMapping, @PutMapping та @DeleteMapping над методами позначають, що саме вони будуть викликані при відповідних методах (GET, POST, PUT та DELETE), вказаних в HTTP-запиті. Аргумент path для цих анотації відіграє ту саму роль, що і для анотації @RequestMapping. @PathVariable перед аргументом, який передається методу, вказує на те, що ця змінна буде взята з запиту, який був надісланий (її розташування визначається в параметрі path анотації над методом). Наприклад, щоб виконати запит на отримання користувача, необхідно виконати HTTP запит з методом GET за URI localhost:8080/user/{id} (у випадку локального підключення), де на місці {id} варто вказати ідентифікатор користувача. @RequestBody вказує, що об'єкт, який передається в метод, повинен знаходитись та буде взятий з тіла HTTP-запита. За замовчуванням, формат передачі об'єкта через HTTP запит – JSON, а тому немає необхідності виконувати додаткові налаштування додатка. Назва кожного методу відповідає бізнес-задачі, яку він виконує.

Клас Main:

```
@SpringBootApplication
        public class Main {
        public static void main(String[] args) {
                SpringApplication.run(Main.class, args); }}
```

Анотація @SpringBootApplication разом з методом SpringApplication.*run* (Main.class, args); вказують, що програма буде виконуватись та ініціалізуватись повністю під контролем Spring фреймворка.

Файл з властивостями application.properties містить три наступні значення, які є необхідними для визначення та підключення до бази даних — url-адреса, логін та пароль:

```
        spring.datasource.url=jdbc:mysql://localhost:3306/RestDB?useLegacyDatetimeCode=false&serv
erTimezone=UTC
        spring.datasource.username=springuser
        spring.datasource.password=springPassword
```

Як результат, запустивши програму ми отримаємо робочий мікросервіс, який містить CRUD операції для таблиці в базі даних, яка зберігає інформацію про користувачів. Перевіримо її роботу. Спочатку додамо нового користувача за допомогою HTTP метода POST, передавши у тілі запита користувача у форматі JSON (запити виконуватимемо у програмі postman, рис. 3):

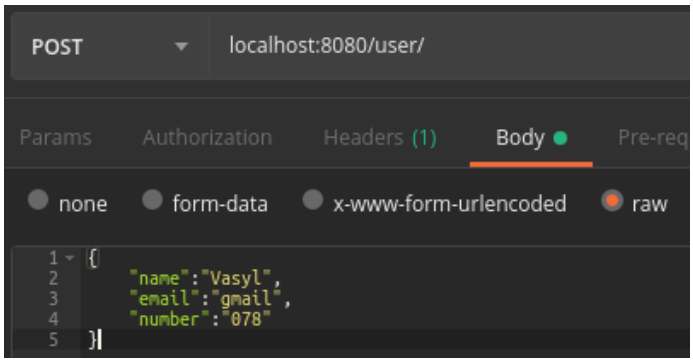


Рис. 3. POST-запит до сервісу

Як результат, мікросервіс записав переданий об'єкт в базу даних, та повернув нам результат запису з новим присвоєним користувачеві id (рис. 4):

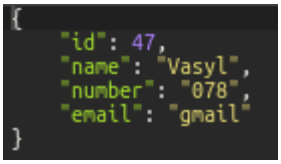


Рис. 4. Результат POST запиту

Потрібно підкреслити той момент, що до мікросервісу здійснюється звертання за URI localhost:8080/user/, оскільки саме такий шлях вказано в класі-контролері. Далі, за допомогою методу PUT можна змінити деякі значення користувача (рис. 5, результат оновлення буде повернений та показаний на рис. 6):

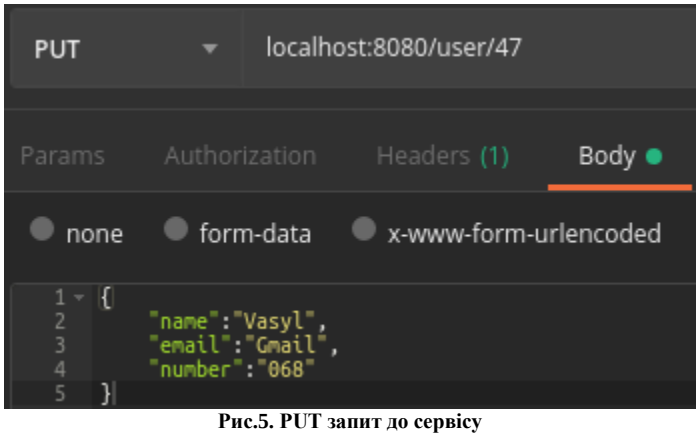


Рис.5. PUT запит до сервісу

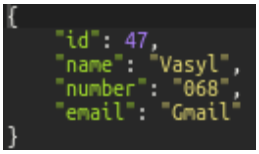


Рис. 6. Результат PUT запиту

Також ми можемо отримати щойно оновленого користувача за допомогою HTTP метода GET (рис. 7 та 8):

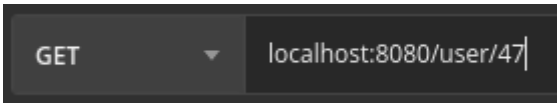


Рис. 7. GET запит до сервісу

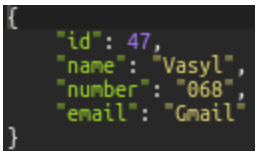


Рис. 8. Результат GET запиту

Також, ми можемо видалити користувача з бази даних, виконавши запит з HTTP методом DELETE (рис. 9, запит нічого не поверне, оскільки в контролері для метода DELETE ми вказали, щоб нічого не поверталось):

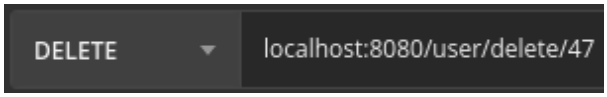


Рис. 9. DELETE запит до сервісу

Отже, створено готовий мікросервіс який можна застосовувати в інших проєктах з мікросервісною архітектурою.

Висновки

Таким чином, можна зробити висновок про те, що мікросервісна архітектура та архітектурний стиль REST є доцільними методиками для створення гнучких, швидких та ефективних веб-додатків, які можна повністю розкрити за допомогою мови Java.

Література

1. Chris Richardson: Microservices Patterns: With examples in Java, Manning Publications; 1 edition (November 19, 2018), ISBN: 9781617294549

2. Мартін Фаулер, Джеймс Льюїс Мікросервіси [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://martinfowler.com/articles/microservices.html

3. Стівен Уоттс, Лора Шифф Огляд архітектури моноліту проти мікросервісів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.bmc.com/blogs/microservices-architecture/

4. Кая Ісмаїл 7 технічних гігантів, що охоплюють мікросервіси [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.cmswire.com/information-management/7-tech-giants-embracing-microservices/

5. Філ Кальчадо Будівництво продуктів на SoundCloud. Частина I: Справа з монолітом [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://developers.soundcloud.com/blog/building-products-at-

soundcloud-part-1-dealing-with-the-monolith

6. Рой філдінг Архітектурні стилі та дизайн мережевих архітектур програмного забезпечення [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm

7. Fielding, Roy T., Gettys, James, Mogul, Jeffrey C., Nielsen, Henrik Frystyk, Masinter, Larry, Leach, Paul J. Berners-Lee, Tim (June 1999). Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1

References

1. Chris Richardson: Microservices Patterns: With examples in Java, Manning Publications; 1 edition (November 19, 2018), ISBN: 9781617294549

2. Martin Fowler, James Lewis Microservices. URL: https://martinfowler.com/articles/microservices.html

3. Stephen Watts, Laura Shiff An Overview of Monolithic vs Microservices Architecture. URL: https://www.bmc.com/blogs/microservices-architecture/

4. Kaya Ismail 7 Tech Giants Embracing Microservices. URL: https://www.cmswire.com/information-management/7-tech-giants-embracing-microservices/

5. Phil Calçado Building Products at SoundCloud. Part I: Dealing with the Monolith. URL: https://developers.soundcloud.com/blog/building-products-at-soundcloud-part-1-dealing-with-the-monolith

6. Roy Fielding. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. URL: https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm

7. Fielding, Roy T.; Gettys, James; Mogul, Jeffrey C.; Nielsen, Henrik Frystyk; Masinter, Larry; Leach, Paul J.; Berners-Lee, Tim (June 1999). Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1

Надійшла / Paper received : 08.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-120-124
УДК 004.056.5:621

Н.І. ПРАВОРСЬКА, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, С.К. ПІДЧЕНКО
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ КРИПТОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В ПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Пристрої Інтернету речей поступово розширюють зону свого застосування. Пристрої виконують задачу збору інформації, накопичення та передачу до інших пристроїв із застосуванням дротових та бездротових технологій. Показано, що для пристроїв IoT також можуть виставлятись вимоги, щодо забезпечення надійності та криптостійкості даних. Для реалізації задачі шифрування можуть використовуватись як симетричні так і асиметричні протоколи. Запропоновано використовувати асиметричний протокол на базі еліптичних кривих. В роботі виконана оцінка апаратних затрат для реалізації блоку криптографічного перетворення із застосуванням 8 та 32 бітних контролерів для ключів довжиною 32 та 64 біти та різних блоків даних. Показано практичну можливість виконання такої роботи.

Ключові слова: криптостійкість, асиметричне шифрування.

N.I. PRAVORSKA, K.L. HORYASHCHENKO, S.K. PIDCHENKO
Khmelnitsky national university, Ukraine

IMPLEMENTATION OF CRYPTOGRAPHIC TRANSFORMATION ALGORITHM IN PROCESSOR SYSTEMS FOR THE INTERNET OF THINGS

Devices for Internet of Things are gradually expanding their scope. Those devices perform the task of collecting information, accumulating and transmitting to other devices with use of wired and wireless technologies. It has been shown that IoT devices can also be required to ensure the reliability and cryptographic stability of data. Both symmetric and asymmetric protocols can be used to implement the encryption task. Block encryption is a substitution based on the block alphabet, which can be mono- or polyalphabetic. Block symmetric encryption is most widely used in the transmission of information over the network, including for packet exchange systems.

It is proposed to use an asymmetric protocol based on elliptic curves. To assess the potential performance of data processing algorithms by the encryption algorithm, you need to determine the actions that use the most CPU time. Such actions include operations of bringing in a degree. To sum up, algorithms are used, the purpose of which is to perform actions on short numbers, the bit size of which is proportional to the bit size of the processor system.Processing time of alphabet values for 8-bit controllers defined.The paper estimates the hardware costs for the implementation of the cryptographic conversion unit using 8-bit and 32-bit controllers for 32 and 64 bits length keys and for different data sizes blocks. ZigBee modules often work in the mode of interval data transmission, such as transmission in the interval of minutes or even hours, in which case, it is established that the 8-bit controller will provide work on encryption and its transmission to the main module. The practical possibility of performing such work is shown. It is seen that the use of 32-bit architecture allows us to archive more than 70 times speed advantage.

Keywords: cryptosecurity, asymmetric encryption.

Вступ

Сьогодні у світі у сфері передачі інформації визначилася стабільна тенденція на посилення ролі технічних засобів захисту даних. Тенденція зовсім не випадкова: неодноразові дослідження в області безпеки даних показали, що використання технічних засобів із елементами криптографії дозволяє звести до мінімуму або виключити негативний вплив самої ненадійної ланки в системі – людини. При цьому, організація розподіленої мережі контролю і передачі за допомогою технічних засобів обходиться споживачеві значно дешевше, а надійність її вища.

Історично, при створенні систем розподіленого контролю основна увага приділялася таким аспектам, як:

- автоматизація, яка дозволяє до мінімуму спростити процеси введення об'єктів під охорону, скоротити обслуговуючий персонал; суттєво скоротити кількість неправдивих тривог через втручання в роботу системи;
- контроль каналу зв'язку, що забезпечує високу достовірність передачі і виключає втрату важливої інформації;
- розробка широкої гамми об'єктових пристроїв з різними функціональними і сервісними можливостями, що дозволяють задовольнити потреби найширших верств населення.

Тому в цілях подальшого розвитку і вдосконалення систем збору та передачі інформації до нових розробок останнім часом пред'являються додаткові вимоги:

- імітостійкість і криптозахист, системи, що забезпечують стійкість, до несанкціонованого «обходу» і обумовлені появою «кваліфікованих» втручань (рис. 1);
- висока інформативність системи, що забезпечує формування сигналів про втручання в спільний потік даних мережі;
- можливість інтеграції системи з оптоволоконними каналами зв'язку, обумовлена введенням в експлуатацію підприємствами зв'язку нових цифрових технологій передачі інформації;

- уніфікація створюваних технічних засобів, тобто можливість об'єднання різних пристроїв в єдиний програмно-апаратний комплекс збору та передачі інформації.

Однією з безпровідних технологій, що швидко розвивається, є ZigBee, яка спочатку розроблялася як низькошвидкісна лінія зв'язку для об'єднання в мережу різних датчиків [1, 2]. Стосовно застосування ZigBee – це можуть бути датчики охоронної і пожежної сигналізації, датчики збору телеметричної інформації, датчики медичних служб та інші.

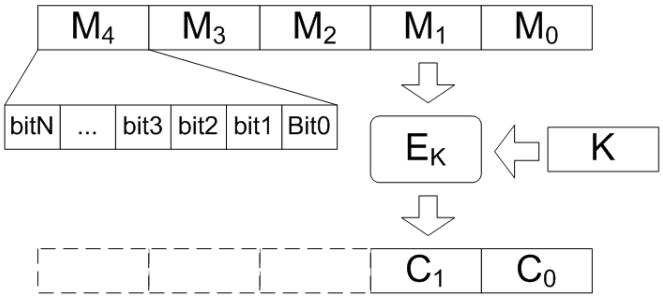


Рис. 1. Робота блочного шифрування

Принцип захисту інформації в телекомунікаційних системах

Блочне шифрування для систем телекомунікацій

Блочне шифрування є різновидом симетричного шифрування, яке виконує дію над групами біт заданої довжини – блоками, що в загальному мають довжину блока в межах 64 – 256 біт.

Якщо відкритий текст має меншу довжину, ніж довжина заданого блока, то перед шифруванням цей блок доповнюється незначущою інформацією. Інакше кажучи, блочне шифрування являє собою підстановку на основі блочного алфавіту, який може бути моно-, або ж поліалфавітним. Найбільшого застосування блочне симетричне шифрування набуло в передачі інформації по мережі, в тому числі для систем пакетного обміну. Роботу блочного шифрування можна представити наступним чином [2, 3] (рис. 1).

Блочний шифр здатний зашифрувати одним ключем одне чи навіть декілька повідомлень, які в загальній сумі їх довжин будуть більшими, аніж довжина ключа шифрування. Однак постає питання про надійність такого шифрування. Ще одним з мінусів блочного шифрування є мала швидкість шифрування, в порівнянні з потоковим шифруванням.

Інтернет речей (IoT) існує менше 15 років, але розвивається з величезною швидкістю. Одночасно з нововведеннями виникають серйозні проблеми, що пов'язані з інформаційною безпекою. Алгоритми, на яких заснована сучасна криптографія занадто складні та використовують багато ресурсів, а їх використання є складним завданням для малопотужних процесів Інтернету речей [2, 5, 6, 11].

Так компанія Hewlett Packard провела дослідження, та в 2015 році виявила, що 70 % пристроїв IoT мають вразливості у безпеці своїх паролів, існують проблеми з шифруванням даних і з дозволом доступу і багато що інше. Так IOT дав поштовх для розвитку нової гілки криптографії – Low Weight Cryptography, LWC. На сьогодні є близько 50 низкоресурсних алгоритмів, але в більшості, вони абсолютно непридатні для використання. Розробники часто не мають змоги обрати алгоритм і чи зможе він працювати на певному пристрої. На рис. 2 показано деякі алгоритми та їх застосування.

SPONGENT	176-bit, на основі AES	алгоритми хешування	**Симетричні шифри**
PHOTON	64-bit, на основі AES		
LESAMNTA - LW	128-bit, на основі AES		
PRESENT	80, 128-bit	алгоритми блокового шифрування	
SPECK	64-256-bit		
CLEFIA	128-bit		
TRIVIUM	64-128-bit	алгоритм потокового шифрування	
Еліптичні криві	128-bit	алгоритм потокового шифрування	**Асиметричний шифр**

Рис. 2. Light Weight Cryptography (LWC) алгоритми (частина) [7, 8, 5, 9, 6]

У асиметричній криптографії використовуються наступні операції алгебри і алгоритми [10]:

- алгоритми перевірки числа на простоту;
- операції алгебри над великими числами: модульне множення, модульне піднесення до степеня, знаходження залишку від ділення, обчислення зворотного числа по модулю.

Найбільш трудомісткими операціями в асиметричній криптографії є операції модульного множення великих чисел і модульного піднесення до степеня великих чисел.

Розробка програмного забезпечення криптографічних операцій

Слід зазначити, що модульне піднесення до степеня складається з ітераційної послідовності

модульних множень. Якщо врахувати, що піднесення до степеня в криптографічних алгоритмах застосовується як безпосередньо, так і побічно (перевірка на простоту, обчислення зворотного числа по модулю та ін.), то стає очевидним, що головним завданням, яке необхідно реалізувати в арифметичному співпроцесорі являється апаратне модульне множення великих чисел [9]:

$$M = a\,b \pmod{n},$$

де a, b - множники;
M – добуток;
n - модуль (просте число);
$a, b, M < n$; усі величини - великі позитивні цілі числа.

Визначення апаратних витрат на обрахунок операції

Виконаємо визначення обчислювальної складності. Фізичний час для обрахунку алфавітів для методу еліптичних кривих визначається як (рис. 3):

$$T_A(n) = \frac{n \cdot \tau_b + n^2 \cdot \tau_k}{f_{CPU}}, \text{ секунд,}$$

де n – розмірність очікуваного алфавіту;
τ_b – операційна складність обрахунку одної букви алфавіту;
τ_k – кількість операцій для виконання математичної операцій пошуку;
f_{CPU} – швидкодія процесора.

Передача інформації в системах IEEE 802.15.4 ZigBee відбувається із використанням блоків даних. Розмір корисної частини залежить від довжини службових полів. Версія стандарту 802.15.4b передбачає передачу інформаційного блоку довжиною 63 байти. Пізніша версія стандарту 802.15.4b дозволяє збільшити корисне навантаження фрейма, коли використовуються короткі адреси (16 біт замість 64). В цьому випадку об'єм даних дорівнюватиме 114 байтам. В такому випадку зростає обсяг корисних даних.

```
int pwr_mod(int a, int b, int m)
{
  int r=1;
  a%=m;
   while (b)
    {
      if (b&1)
        r=(r*a)%m;
      a=(a*a)%m;
      b>>=1;
    }
  return r;
}
```

Рис. 3. Реалізація алгоритму підведення в ступінь a^b

Для оцінювання потенційної працездатності для алгоритмів обробки даних за алгоритмом шифрування, потрібно визначити дії, що використовують найбільше процесорного часу. До таких дій відносяться операції підведення в ступінь. Для підведення в ступінь використовуються алгоритми, мета яких виконати дії над короткими числами, розрядність яких співрозмірна з розрядністю процесорної системи. Як можна побачити з рис.3, підведення в ступінь складається з ряду дій – зсуву (множення) та ділення. Оцінка витрат часу наведена в табл. 1

Таблиця 1

Операційні витрати на обрахунок одної математичної операції

Тип процесора	τ_b, такти	τ_k,такти	f_{CPU}, МГц
	Ключ 32 біта		
8-біт, AVR RISC	24	140	24
32-біт, ARM RISC	7	42	200
	Ключ 64 біта		
8-біт, AVR RISC	180	2270	24
32-біт, ARM RISC	33	320	200

Результат моделювання часу для опрацювання розміру блока від 32 до 256 байт показано на рис. 3 та рис. 4., а детальні відомості в таблиці 2.

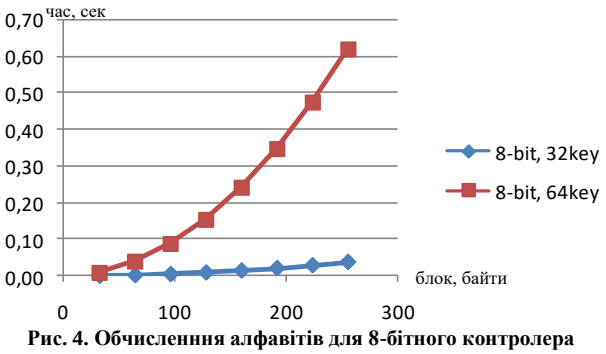


Рис. 4. Обчислення алфавітів для 8-бітного контролера

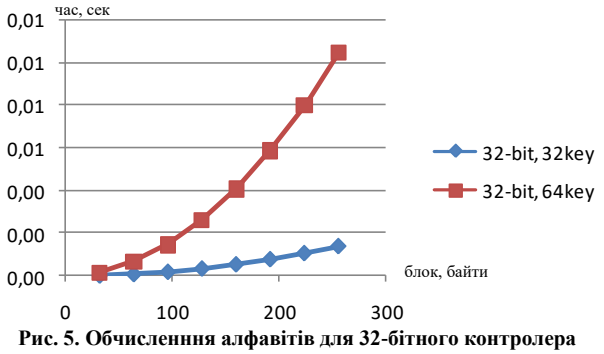


Рис. 5. Обчислення алфавітів для 32-бітного контролера

Як видно з рис. 3 та рис. 4 для 8-бітного контролера, час обрахунку одного значення алфавіту для 8-бітних контролерів є суттєвим значенням. В загальному видно, що застосування 32 бітної архітектури дозволяє отримати більш ніж 70 разову перевагу.

Таким чином, з таблиці 2 видно, що тільки для 8 бітного контролера з ключем в 64 біти не досягається можливість обробки блоків за 1 секунду.

Таблиця 2

Шифрування та підготовка даних для передачі згідно стандартів 802.15.4b та 802.15.4a

Розмір блоку шифрування, біти	802.15.4b		802.15.4a	
	Час підготовки блоку, 63 байт	Кількість блоків за 1 сек	Час підготовки блоку, 127 байт	Кількість блоків за 1 сек
8 бітний контролер, ключ 32 біти				
32	0,020808	48,05	0,041947	23,83
64	0,083012	12,04	0,167342	5,97
96	0,186611	5,35	0,376184	2,65
128	0,331605	3,01	0,668474	1,49
160	0,517994	1,93	1,044211	0,95
192	0,745779	1,34	1,503396	0,66
224	1,014959	0,98	2,046028	0,48
256	1,325533	0,75	2,672107	0,37
8 бітний контролер, ключ 64 біти				
32	0,336428	2,97	0,678197	1,47
64	1,34405	0,74	2,709435	0,36
96	3,022866	0,33	6,093714	0,16
128	5,372875	0,186	10,83103	0,092
160	8,394078	0,119	16,9214	0,059
192	12,08647	0,082	24,3648	0,041
224	16,45006	0,060	33,16124	0,030
256	21,48485	0,046	43,31073	0,023
32 бітний контролер, ключ 32 біти				
32	0,000749	1335,12	0,00151	662,30
64	0,002988	334,64	0,006024	166,00
96	0,006718	148,86	0,013542	73,84
128	0,011937	83,77	0,024064	41,55
160	0,018647	53,62	0,03759	26,60
192	0,026847	37,24	0,054121	18,47
224	0,036538	27,36	0,073655	13,57
256	0,047718	20,95	0,096194	10,39
32 бітний контролер, ключ 64 біти				
32	0,005695	175,58	0,011481	87,09
64	0,022745	43,96	0,045851	21,80
96	0,051148	19,55	0,103109	9,69
128	0,090906	11,00	0,183255	5,45
160	0,142018	7,04	0,28629	3,49
192	0,204484	4,89	0,412213	2,42
224	0,278304	3,59	0,561025	1,78
256	0,363478	2,75	0,732725	1,36

Враховуючи, що модулі ZigBee часто працюють в режимі інтервальної передачі даних, як то передача в інтервалі хвилин або навіть годин, то в такому випадку, встановлено, що 8-бітний контролер забезпечить роботу з шифрування та передачі її на основний модуль.

Висновки

Як показано в таблиці, блочний алгоритм підготовлює блоки даних кратні 2^n байт. Але в стандартах 802.15.4a та 802.15.4b розмір блоку є 127 та 63 байти, а тому при передачі даних буде необхідно робити вирівнювання до більшого розміру. Так, при передачі 64 блоку даних буде використано один блок 127 байт – а, отже "доданих" байтів буде 63, майже 50%. Для блоку в 96 байт – лишніх потрібно 31 байт (25% від загального обсягу пакету). Тому обсяг корисних даних для стандарту ZigBee буде значно меншим ніж обсяг переданих даних. Якщо за стандартом 802.15.4 швидкість передачі даних складає до 250 кБіт/с, то реальна швидкість буде зменшена, через наявність "доданих" байтів, що не несуть корисного навантаження.

Література

1. Стрельницкий А.А. Волновые каналы архитектурных сооружений. Усовершенствованная модель и новый эксперимент / А.А. Стрельницкий, А.Е. Стрельницкий, А.И. Цопа, В.М. Шокало // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2007. – Выпуск №151. – С. 158-163.

2. Хоффман Л.Дж. Современные методы защиты информации / Л. Д. Хоффман. – М.: Советское радио, 1980. – С. 87. – 164 с.

3. Панасенко С.П. Защита информации в компьютерных сетях / С. П. Панасенко // Журнал «Мир ПК» 2002 № 2.

4. Хоффман Л.Дж. Современные методы защиты информации / Л. Д. Хоффман. – М.: Советское радио, 1980. – С. 87. – 164 с.

5. Ростовцев А.Г. Алгебраические основы криптографии / А. Г. Ростовцев. – СПб.: Мир и семья, Интерлайн, 2000. – С. 112-220.

6. Шнейер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке С / Б. Шнейер – М.: Триумф, 2002. – С. 12. – 216 с.

7. Чмора А. Л. Современная прикладная криптография. – М.: "Гелиос АРВ", 2001. – 256 с.

8. Соловьев Ю.П. Эллиптические кривые и современные алгоритмы теории чисел / Ю. П. Соловьев, В. А. Садовничий, Е.Т. Шавгулидзе. – М.: Ижевск, 2003. – С. 60-92.

9. Lopez J. Fast multiplication on elliptic curves over GF(2n) without precomputation / J. Lopez, R. Dahab. – Lecture Notes in Computer Science. 2000. № 1965. – P. 317-327.

10. Василенко О.Н. Теоретико-числовые алгоритмы в криптографии. – М.: МЦНМО, 2003. – 325 с.

11. Горященко К.Л. Впровадження технологій PLC / К.Л. Горященко, О.П. Войтюк, С.Л. Кушнірук, О.В. Шевчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – №2. – С. 250-253.

References

1. Strel'nickij A.A. Volnovye kanaly arhitekturnyh sooruzhenij. Usovershenstvovannaja model' i novyj jeksperiment / A.A. Strel'nickij, A.E. Strel'nickij, A.I. Copa, V.M. Shokalo // Radiotehnika. Vseukrainskij mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik. – 2007. – Vypusk №151. – S. 158-163.

2. Hoffman L.Dzh. Sovremennye metody zashhity informacii / L. D. Hoffman. – M.: Sovetskoe radio, 1980. – C. 87 – 164 s.

3. Panasenko S.P. Zashhita informacii v komp'juternyh setjah / S. P. Panasenko // Zhurnal «Mir PK» 2002 № 2.

4. Hoffman L.Dzh. Sovremennye metody zashhity informacii / L. D. Hoffman. – M.: Sovetskoe radio, 1980. – C. 87 – 164 s.

5. Rostovcev A.G. Algebraicheskie osnovy kriptografii / A. G. Rostovcev. – SPb.: Mir i sem'ja, Interlajn, 2000. – S. 112 – 220.

6. Shnejer B. Prikladnaja kriptografija. Protokoly, algoritmy, ishodnye teksty na jazyke C / B. Shnejer – M.: Triumf, 2002. – S. 12 – 216 s.

7. Chmora A. L. Sovremennaja prikladnaja kriptografija. – M.: "Gelios ARV", 2001. – 256 s.

8. Solov'ev Ju.P. Jellipticheskie krivye i sovremennye algoritmy teorii chisel / Ju. P. Solov'ev, V. A. Sadovnichij, E.T. Shavgulidze. – M.: Izhevsk, 2003. – C. 60 – 92.

9. Lopez J. Fast multiplication on elliptic curves over GF(2n) without precomputation / J. Lopez, R. Dahab. – Lecture Notes in Computer Science. 2000. № 1965. – P. 317 – 327.

10. Vasilenko O.N. Teoretiko-chislovye algoritmy v kriptografii. – M.: MCNMO, 2003. – 325 s.

11. Horiaschenko K.L., Voitiuk O.P., Kushniruk S.L., Shevchuk O.V. Implementation of PLC technologies. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2017. Issue 2. P. 250-253

Надійшла / Paper received : 21.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-125-130
УДК 004.9

М.П. КОМАР
Західноукраїнський національний університет

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ВЕЛИКИХ ДАНИХ

В статті розроблено методологію створення інтелектуальних систем обробки та аналізу великих даних в умовах невизначеності, неповноти та нечіткості інформації, яка базується на використанні наступних принципів: горизонтальної масштабованості, відмовостійкості, локальності даних, стійкості до помилок у даних, адаптивності, еволюційності.

Запропоновані принципи покладені в основу для розроблення моделей і методів інтелектуальної обробки та аналізу великих даних: методу відновлення відсутніх даних, який створює додаткові значення даних на основі функціональних залежностей та правил асоціації та додає ці значення до наявних навчальних даних; методу прийняття рішень в процесі експлуатації системи на базі нечіткої логіки, який забезпечує автономну роботу процесу обробки та аналізу великих даних без будь-якого втручання користувача; методу навчання глибоких нейронних мереж на основі об'єднання генетичного алгоритму і нейронної мережі для знаходження оптимальних параметрів нейронної мережі; методу паралельного навчання глибоких нейронних мереж на основі розбиття навчальної вибірки на підвибірки і паралельного навчання кожної підвибірки на окремій копії моделі нейронної мережі.

Для інформаційної підтримки запропонованих моделей і методів розроблено інформаційну технологію інтелектуальної обробки та аналізу великих даних. Запропоновану технологію реалізовано в рамках інтелектуальної системи обробки та аналізу великих даних. Дослідження результатів застосування розробленої системи запропоновано провести на основі прогнозування результатів футбольних матчів.

Ключові слова: *інформаційна технологія, інтелектуальна система, обробки та аналізу великих даних, глибока нейронна мережа, нечітка логіка, генетичний алгоритм, паралельне навчання, прогнозування.*

M.P. KOMAR
West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY OF INTELLIGENT PROCESSING AND ANALYSIS BIG DATA

The methodology for creating intelligent systems for processing and analyzing big data in conditions of uncertainty, incompleteness and vagueness of information developed in the article, based on the use of the following principles: horizontal scalability, fault tolerance, data locality, resistance to data errors, adaptability, evolution.

The proposed principles are the basis for the development of models and methods of intelligent processing and analysis of big data: the method of recovering missing data, which creates additional data values based on functional dependencies and association rules and adds these values to existing training data; the method of decision-making in the operation of the system on the basis of fuzzy logic, which provides autonomous operation of the process of processing and analysis of large data without any user intervention; a method of learning deep neural networks based on the combination of genetic algorithm and neural network to find the optimal parameters of the neural network; method of parallel learning of deep neural networks based on the division of the training sample into sub-samples and parallel training of each sub-sample on a separate copy of the neural network model.

For information support of the offered models and methods the information technology of intellectual processing and the analysis of big data is developed. The proposed technology is implemented within the intelligent system of big data processing and analysis. Research on the results of the application of the developed system is proposed to be conducted on the basis of forecasting the results of football matches.

Keywords: *information technology, intelligent system, big data processing and analysis, deep neural network, fuzzy logic, genetic algorithm, parallel learning, forecasting.*

Вступ. Постановка проблеми

На сьогодні глибоке навчання (Deep Learning) і великі дані (Big Data) є одними з найбільш гарячими тенденціями в швидко зростаючому цифровому світі [1]. Існують різні визначення терміну Big Data [2–6], проте в даній роботі звертаємо увагу на експоненціальне зростання і широке поширення цифрових даних, які важко, або навіть неможливо обробляти і аналізувати за допомогою звичайних програмних засобів і технологій. Ці обмеження призвели до еволюції технологій навколо великих даних. Великі дані, що визначаються швидким зростанням обсягу, різноманітності та швидкості передачі даних, зазвичай мають справу з неструктурованими даними, які потребують великого пакетного аналізу або аналізу в режимі реального часу.

Для того, щоб ефективно обробляти великі обсяги даних при прийнятних часових затратах, необхідні особливі технології. Сьогодні методи машинного навчання [7-10], зокрема глибокого навчання [11–13] разом з досягненнями в області обчислювальної потужності, відіграють важливу роль у аналітиці великих даних. Глибокі нейронні мережі [14–17] мають велику ефективність нелінійного перетворення і представлення даних в порівнянні з традиційними нейронними мережами.

Перспективним напрямом є інтеграція великих потоків даних із моделями глибокого навчання та розробка на цій основі технологій обробки та аналізу великих даних. Метою дослідження є розробка моделей, методів та інформаційної технології інтелектуальної обробки та аналізу великих даних.

1. Методологія створення інтелектуальних систем обробки та аналізу великих даних

Методологія створення інтелектуальних систем обробки та аналізу великих даних в умовах невизначеності, неповноти та нечіткості інформації базується на використанні наступних принципів:

- горизонтальної масштабованості;
- відмовостійкості;
- локальності даних;
- стійкості до помилок у даних;
- адаптивності;
- еволюційності.

Запропоновані принципи покладені в основу для розроблення моделей та методів інтелектуальної обробки та аналізу великих даних:

1. Моделі і методу відновлення відсутніх даних, який створює додаткові значення даних на основі функціональних залежностей та правил асоціації та додає ці значення до наявних навчальних даних, що, в свою чергу, дало змогу підвищити ефективність подальшого аналізу даних.

2. Методу прийняття рішень в процесі експлуатації системи на базі нечіткої логіки, який забезпечує автономну роботу процесу обробки та аналізу великих даних без будь-якого втручання користувача, що дозволяє підвищити швидкодію та унеможливити виникнення помилок користувача при роботі з тим чи іншим набором великих даних та дає можливість обробляти та аналізувати потокові дані в режимі реального часу.

3. Методу навчання глибоких нейронних мереж на основі об'єднання генетичного алгоритму і нейронної мережі для знаходження оптимальних параметрів нейронної мережі, що дало можливість здійснювати аналіз даних вже на ранніх етапах роботи генетичного алгоритму, тобто паралельно з його роботою. Ця можливість обумовлена додаванням в базу даних мереж, що мають мінімальну середньоквадратичну помилку, на кожному кроці генетичного алгоритму.

4. Методу паралельного навчання глибоких нейронних мереж за рахунок розбиття навчальної вибірки на підвибірки і паралельного навчання кожної підвибірки на окремій копії моделі нейронної мережі, що дозволило збільшити швидкість навчання та зменшити використання пам’яті графічних процесорів.

2. Архітектура інтелектуальної системи обробки та аналізу великих даних

Запропоновану технологію реалізовано в рамках інтелектуальної системи обробки та аналізу великих даних. Компоненти архітектури системи BDDL представлено на рис. 1.

Користувацький інтерфейс. Це інтерфейс, який відображає інформацію з різних компонентів запропонованої системи, а також дозволяє користувачу виконувати різні дії, такі як вибір даних, попередня обробка даних та навчання глибоких нейронних мереж.

Модуль управління. Він діє як посередник між користувацьким інтерфейсом та іншими компонентами системи. Цей модуль інтерпретує дії користувача та викликає відповідний модуль. По-перше, він викликає модуль формування та вибору набору даних для обробки потоку великих даних, який вибраний користувачем у користувацькому інтерфейсі для подальшої обробки. Далі модуль управління перенаправляє дії користувача до одного з модулів попередньої обробки даних чи модуля відновлення відсутніх даних для виконання відповідних операцій над даними, які допомагають перетворити дані у необхідний формат для наступного кроку. Пізніше модуль управління надсилає попередньо оброблений набір даних модулю навчання глибоких нейронних мереж, а той в свою чергу, при необхідності, - модулю паралельного навчання.

Після того, як користувач закінчить навчання моделі, йому надається можливість записати всі виконані кроки в базу даних результатів. Вибрані файли, усі операції попередньої обробки даних, параметри навчання моделі та вибрана модель глибокого навчання записуються у файл JSON. В майбутньому той самий експеримент користувача з усім набором даних можна виконати автоматично, використовуючи ці записані кроки. Значення кожного кроку користувача витягуються з файлу JSON і виконуються у фоновому режимі.

Модуль формування та вибору набору даних. Цей модуль надає можливості вибору різних потоків великих даних із різних джерел даних. Він дозволяє користувачеві вибрати різні типи даних, такі як текст, зображення, відео, звук, числові ряди та ін. Він також обробляє великі потоки даних з різних джерел даних, таких як розподілена файлова система Hadoop (HDFS) для пакетних даних та Apache Storm та Apache Spark для потоків даних у реальному режимі часу. Основні функції модуля формування та вибору набору даних:

- дозволяє відбирати різні типи даних;
- дозволяє сформувати потоки даних з різних джерел даних;
- дозволяє користувачам вибрати файл або кілька файлів, щоб виконати наступні дії.

Потім вибрані файли даних використовуються як вхідні дані для одного з модулів попередньої обробки даних (текстових чи зображень).

Модуль попередньої обробки текстових даних. Він надає користувачеві бібліотеку операцій для виконання маніпуляцій та перетворень із вибраними текстовими даними. Використовуючи попередню обробку даних, користувач може перетворити необроблені дані в нормальний набір даних у певному форматі. Він включає такі задачі, як очищення даних, нормалізація, трансформація, зменшення розмірності тощо. Модуль попередньої обробки текстових даних підтримує наступні операції з даними:

1. Очищення даних. Основною метою цієї функції є видалення невідповідностей, надлишкових та нерелевантних даних. Це дозволяє видалити відсутні значення, зашумлені дані та виправити невідповідні дані.

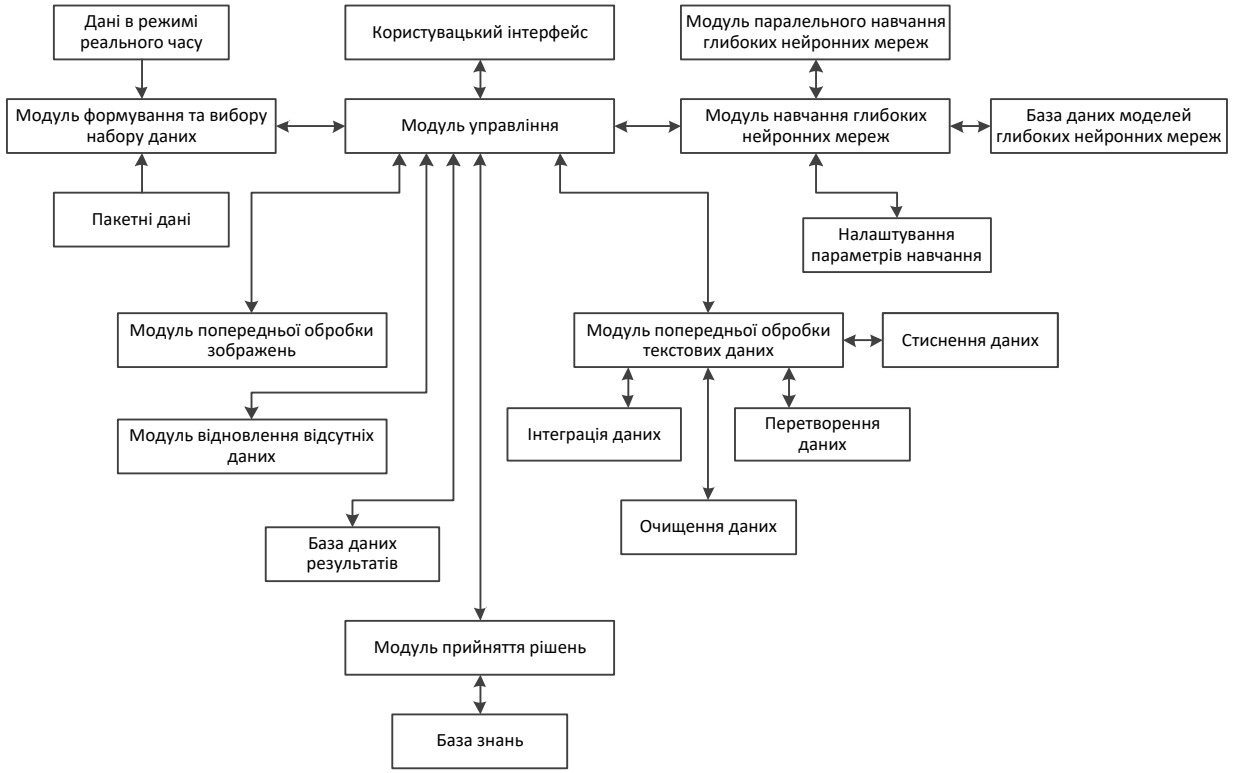


Рис. 1. Архітектура системи BDDL

2. Інтеграція даних. Ця операція дозволяє інтегрувати дані з декількох джерел (файлів даних) в єдиний набір даних шляхом об'єднання значень атрибутів.

3. Зменшення даних. Це дозволяє згенерувати стиснуту версію всього набору даних використовуючи метод головних компонент чи автоенкодер.

4. Перетворення даних. Це дозволяє перетворити дані у формат, який вимагають моделі глибокого навчання. Це передбачає нормалізацію - перетворення значення атрибута (числовий атрибут) у заданий діапазон, агрегацію - поєднання атрибутів в один атрибут та узагальнення - заміна атрибутів нижчого рівня або примітивних (необроблених) даних концепціями вищого рівня.

Результатом попередньої обробки є набір даних, який можна використовувати як остаточний навчальний набір для моделей глибокого навчання.

Модуль попередньої обробки зображень. Після вибору файлів зображень для подальшої обробки система надає користувачеві різні операції, такі як обрізання зображення, обертання зображення, регулювання яскравості, насиченості та ін. Для виконання цих операцій на зображеннях доцільно використовувати фреймворк Tensorflow.

Модуль відновлення відсутніх даних. Його суть полягає в обробці структурованих та напівструктурованих даних на основі ієрархії об'єктів, а також набору функціональних залежностей та розробки правил асоціації. Це питання дуже важливе для інтерфейсів великих даних, оскільки більша частина інформації доступна в напівструктурованому вигляді. Запропонований підхід створює додаткові значення даних за допомогою доменних та функціональних залежностей на основі декількох методів обчислення та додає ці значення до наявних навчальних даних. Правильність обчислених значень перевіряється на класифікаторі, побудованому на вихідному наборі даних.

Модуль навчання глибоких нейронних мереж. Він надає користувачеві можливість вибрати з бази даних модель глибокого навчання для виконання різних задач, таких як класифікація, прогнозування та рекомендації та ін. Для навчання моделей цей модуль використовує попередньо оброблений набір даних з одного з модулів попередньої обробки. Він також надає користувачеві можливість вибору значень для різних параметрів для оптимізації процесу навчання.

Основними задачами модуля навчання глибоких нейронних мереж:

- дозволяє користувачам вибирати значення різних параметрів навчання, таких як кількість епох, розмір партії, функція активації, швидкість навчання, крок, кількість шарів, кількість нейронів у відповідному шарі;
- дозволяє користувачам вибирати різні моделі глибокого навчання для різних задач, таких як класифікація, прогнозування, рекомендації та ін.

Користувач може також змінювати значення параметрів навчання за замовчуванням. Для підвищення ефективності навчання глибоких нейронних мереж можна використати генетичні алгоритми. Генетичний алгоритм – адаптивний метод пошуку, який все частіше використовується для вирішення задач функціональної оптимізації. Він заснований на генетичних процесах біологічних організмів: біологічні

популяції розвиваються впродовж декількох поколінь, підкоряючись законам природного відбору і принципу «виживає найбільш пристосований». Початкові покоління наборів параметрів (особин) для генетичного алгоритму визначаються випадковим чином. Далі, найбільш пристосованими особинами вважаються набори, навчені на яких мережі дають мінімальні помилки. Нове покоління особин виходить шляхом схрещування найбільш пристосованих особин попереднього покоління і мутації.

Модуль паралельного навчання. За необхідності, можна використати переваги паралельного навчання глибоких нейронних мереж. Основною проблемою при глибокому навчанні є висока ресурсоємність навіть невеликих нейронних мереж. Реальний об'єм пам'яті, потрібний для мережі середнього розміру ResNet-50, що має 26 мільйонів вагових параметрів і обчислює близько 16 мільйонів операцій при прямому проході, складає майже 8 Гб оперативної пам'яті. Даний модуль дозволяє використовувати хмарні платформи 1Cloud, Azure, Google Cloud, де можна замовити віртуальні сервери потрібної конфігурації з підтримкою GPU та без неї на потрібний час.

Модуль прийняття рішень. Цей модуль дозволяє приймати рішення в процесі експлуатації системи на базі нечіткої логіки використовуючи правила нечіткого висновку Мамдані. Побудовані правила зберігаються в базі знань. Модуль прийняття рішень забезпечує автономну роботу процесу обробки та аналізу великих даних без будь-якого втручання користувача, що дозволяє підвищити швидкодію та унеможливити виникнення помилок користувача при роботі з тим чи іншим набором великих даних та дає можливість обробляти та аналізувати потокові дані в режимі реального часу, що є надзвичайно актуальним при побудові сучасних систем аналізу мережевого трафіку з метою виявлення вторгнень чи інших систем, наприклад, систем Інтернету Речей.

3. Дослідження результатів застосування розробленої системи

Дослідження результатів застосування розробленої системи запропоновано провести на основі прогнозування результатів футбольних матчів англійської Прем'єр-ліги. Для опису сильних сторін футбольних команд можна використовувати багато різних показників. Підбір показників, що формують рейтинг футбольної команди, є важливою задачею. Необхідно вибирати такі показники, які мають високий ступінь інформації та значення для опису колективу. Найбільш значущими показниками є місце в турнірній таблиці, кількість очок за вибраний інтервал часу, кількість забитих голів за вибраний інтервал часу, кількість пропущених голів тощо.

Розглянемо показники, які було обрано для формування навчальної вибірки:

- S – кількість ударів команди;
- ST – кількість ударів команди в площину воріт;
- C – кількість кутових ударів команди;
- F – кількість фолів команди;
- CS – кількість жовтих та червоних карточок команди;
- GS – кількість забитих командою голів;
- HTGS – кількість забитих командою голів в першому таймі;
- GC – кількість пропущених командою голів;
- HTGC – кількість пропущених командою голів в першому таймі.

Наведені показники можна завантажити з Football-Data.co.uk [18] і включати інформацію про всі ігри Прем'єр-ліги з 2002 року. Для формування вхідних даних не використовується інформація лише про останній матч, оскільки її недостатньо для побудови повної інформації про умови команд. Замість цього використовуємо останні 35 збігів та обчислюємо агреговані статистичні показники. Такі показники є більш інформативними і можуть бути використані для оцінки поточного стану команди. Агрегація вхідного шаблону виконується шляхом усереднення кожного параметра для 35, 15, 10, 5 збігів. І так по кожному показнику.

Крім того, розраховуємо стандартне відхилення для 35 збігів і додаємо його до шаблону даних. Стандартне відхилення дає інформацію про стабільність команди і дуже важливе для прогнозування результату.

Після агрегування отримуємо вхідний вектор, що складається із 108 значень - 54 значення для обох команд. Крім того, вхідні дані нормуються за такими статистичними показниками: середнє значення та середнє відхилення. Це дозволяє отримати більш стабільну модель прогнозування.

Для прогнозування спортивних результатів була використана еластична нейронна мережа. Вибір цієї структури нейронної мережі обумовлений тим, що вона здатна робити хороші прогнози, використовуючи не повні дані. Архітектура нейронної мережі для прогнозування результатів матчів еластичну мережу з архітектурою, показаною на рис. 2.

Вхідний шар містить 108 нейронів. Розмірність вхідного шаблону визначає кількість вхідних нейронів. Мережа має три приховані шари зі 128, 64 та 32 нейронами у кожному шарі відповідно та 3 нейронами у вихідному шарі. Така мережа, яка містить кілька прихованих шарів, називається Deep Elastic Net.

Підготовлений шаблон (див. рисунок 3.5) надходить на вхід мережі. Далі три приховані шари з функціями активації LeakyReLU виконують обчислення на вхідному шаблоні. Три вихідні нейрони відображають результати обчислень, інтерпретовані в наступній формі: виграш - нічия - програш. Перший нейрон виходу відповідає за перемогу господарів, другий нейрон - за нічию в матчі, а третій нейрон - за перемогу команди гостей. Використовується функція активації softmax для нейронів вихідного шару.

Відмінною особливістю Elastic Net є те, що вона використовує регуляризацію L1, L2. У той час як

регуляризація L1 (також відома як Регресія Лассо) використовується для вибору параметрів, регуляризація L2 (також відома як Ridge Regression) здійснює контроль над переналагодженням мережі (переналагодження означає зростання модельних коефіцієнтів) у процесі навчання.

Для тестування системи, розробленої для прогнозування результатів футбольних матчів англійської Прем'єр-ліги, було використано набір даних, що складається з 5018 шаблонів (тобто набір містить інформацію про всі ігри з 2002 року). Для дострокового завершення навчального процесу було використано перевірочний набір розміром 15% від навчального набору.

Для вивчення Deep Elastic Net були обрані такі параметри:

- коефіцієнт для регуляризації L1 = 0,002;
- коефіцієнт для регуляризації L2 = 0,0005;
- алгоритм навчання - SGD (стохастичний градієнтний спуск) з кроком, рівним 0,01;
- розмір мініпартії дорівнює 64.

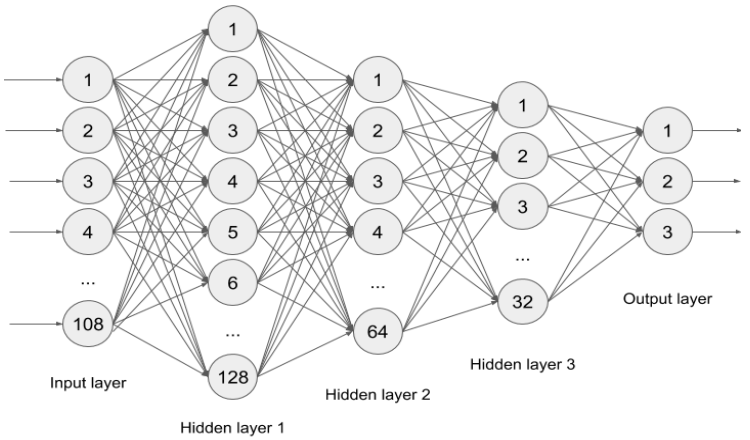


Рис. 2. Структура розробленої мережі Deep Elastic для прогнозування результатів футбольних матчів

Процес навчальння нейронної мережі займає приблизно 5 хвилин на наступній конфігурації ПК: графічний процесор NVidia 1070TI, процесор Xeon e5-2680 v2, оперативна пам’ять 32 ГБ.

Навчена система була протестована на останніх 350 матчах Прем’єр-ліги, які не були включені до навчальних та перевірочних наборів.

Результати прогнозування представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати прогнозування

Команди та остаточний рахунок матчу	Перемога команди господарів, %	Нічия в матчі, %	Перемога команди гостей, %
West Ham vs Southampton (score 3:0)	41,6	24,7	33,7
Huddersfield vs Man United (score 1:1)	24,3	15,4	60,2
Leicester vs Arsenal (score 3:0)	30,3	43,5	26,2
Burnley vs Man City (score 0:1)	14,2	19,1	66,7
Fulham vs Cardiff (score 1:0)	48,3	27,5	24,3
Wolves vs Fulham (score 1:0)	72,7	17,4	9,9

Система показала точність прогнозування на наборі даних 61,14%. Використовуючи результати прогнозування розробленої системи, користувачі можуть зробити ставку на ту чи іншу команду в майбутньому матчі.

Висновки

На основі інтеграції великих потоків даних із моделями глибокого навчання розроблено інформаційну технологію інтелектуальної обробки та аналізу великих даних, яка передбачає вибір даних з різних архітектур великих даних, попередню обробку та відновлення відсутніх даних, навчання глибоких нейронних мереж на основі генетичного алгоритму для знаходження оптимальних параметрів нейронної мережі, паралельне навчання моделей глибоких нейронних мереж та прийняття рішень на основі нечіткої логіки, що дозволило підвищити ефективність обробки та аналізу великих даних і забезпечити автономну роботу процесу в порівнянні з відомими інформаційними технологіями.

Запропоновану технологію реалізовано в рамках інтелектуальної системи обробки та аналізу великих даних. Дослідження результатів застосування розробленої системи проведено на основі прогнозування результатів футбольних матчів. Пропонований підхід базується на глибокій еластичній мережі і може навчатися на наборі даних з обмеженим відкритим доступом. Експериментальні дослідження показали точність прогнозування на наборі даних 61,14%. Використовуючи результати прогнозування розробленої системи, користувачі можуть зробити ставку на ту чи іншу команду в майбутньому матчі.

Систему можна вдосконалити за допомогою використання більш детального та повного набору даних, який може бути забезпечений платними ресурсами та розробки більш складної структури глибокої нейронної мережі.

References

1. Chen X.-W. Big Data Deep Learning / X.-W. Chen, X. Lin // IEEE Access. – 2014. – Vol. 2. – P. 514-525.

2. Lynch C. Big data: science in the petabyte era / C. Lynch // Nature. – 2008. – Vol. 455. – P. 1-50.

3. Jean-Pierre D. Big Data for the Enterprise / D. Jean-Pierre // Oracle. http://Big Datawithoracle-521307.pdf [Access 18.08.2020].

4. Великі дані (Big Data). https://rb.ru/howto/chto-takoe-big-data [Access 18.08.2020].

5. The National Security Agency: Missions, Authorities, Oversight and Partnerships. http://www.nsa.gov [Access 18.08.2020].

6. Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity. McKinsey Global Institute. http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/big_data_the_next_frontier_for_innovation [Access 18.08.2020].

7. Lin J. Large-scale machine learning at twitter / J. Lin, A. Kolcz // Proc. ACM SIGMOD Scottsdale Arizona USA. – 2012. – P. 793-804.

8. Smola A. An architecture for parallel topic models / A. Smola, S. Narayanamurthy // Proc. VLDB Endowment. – 2010. – Vol. 3, No. 1, pp. 703–710.

9. Ng A. et al. Map-reduce for machine learning on multicore // Proc. Adv. Neural Inf. Procees. Syst. – 2006. – Vol. 19, pp. 281–288.

10. Panda B. MapReduce and its application to massively parallel learning of decision tree ensembles / B. Panda, J. Herbach, S. Basu, and R. Bayardo // In Scaling Up Machine Learning: Parallel and Distributed Approaches. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2012.

11. Crego E. Big data and deep learning: Big deals or big delusions / E. Crego, G. Munoz, and F. Islam.? Business. http://www.huf_ngtonpost.com/george-munoz-frank-islamand-ed-crego/big-data-and-deep-learnin_b_3325352.html [Access 19.08.2020].

12. Bengio Y. Modeling high-dimensional discrete data with multi-layer neural networks / Y. Bengio, S. Bengio // In Proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst. – 2000. - Vol. 12., pp. 400–406.

13. Marc'Aurelio Ranzato Y. Sparse feature learning for deep belief networks / Y. Marc'Aurelio Ranzato, L. Boureau, Y. LeCun // In Proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst. – 2007. – Vol. 20., pp. 1185–1192.

14. Hinton G.E. A fast learning algorithm for deep belief nets / G. E. Hinton, E.S. Osindero, Y. Teh // Neural Computation. – 2006. – Vo1. 18. – pp. 1527–1554.

15. Hinton G. Reducing the dimensionality of data with neural networks / G. Hinton, R. Salakhutdinov // Science. – 2006. – Vo1. 313 (5786). – pp. 504–507.

16. Hinton G.E. A practical guide to training restricted Boltzmann machines / G.E. Hinton // Machine Learning Group, University of Toronto. – 2010 (Tech. Rep. 2010-000).

17. LeCun Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521 (7553). – pp. 436–444.

18. Football-Data. http://www.football-data.co.uk [Access 20.08.2020].

Надійшла / Paper received : 14.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-131-136
УДК 539.3

В.П. ЯСНІЙ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ АУСТЕНІТУ СПЛАВІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

В даній роботі досліджено вплив асиметрії циклу навантаження на модуль пружності аустеніту псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми і його взаємозв'язок із залишковою деформацією. Зі збільшенням розмаху напружень від 509 МПа до 748 МПа оборотна деформація у першому циклі зростає з 3,7% до 7,7%. Встановлено, що за однакового ефективного модуля пружності NiTi сплаву залишкова деформація при асиметрії циклу навантаження 0,5 приблизно удвічі перевищує значення щалишкової деформації при віднульовому циклі навантаження.

Ключові слова: псевдопружний NiTi сплав, асиметрія циклу навантаження, модуль пружності.

V. IASNII
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

MAIN REGULARITIES OF INFLUENCE OF CYCLICIC LOADING PARAMETERS ON THE MODULE OF ELASTICITY AUSTENITE OF SHAPE MEMORY ALLOYS

Abstract – In this paper, there were investigated the regularities of the influence of the amplitude and stress ratio on the effective Young's modulus of a pseudoelastic shape memory NiTi alloy and its relationship with other functional properties. Cylindrical specimens with a diameter of 4 mm and gage length of 12.5 mm, machined from rod that was 8 mm in diameter, were tested on servohydraulic testing machine STM-100 under uniaxial cyclic loading at temperature 0°C at stress ratio 0 and 0.5. Tests were carried out under displacement–controlled mode at stress ratio 0 and at stress ratio 0.5 under stress–controlled mode. With the increase in the loading cycles, the residual strain grows. An increase in the stress range from 509 to 605 MPa increases the residual strain that leads to the degradation of pseudoelasticity. However, with the further increase in the initial stress range to 740 MPa, the dependence of residual deformation on the number of loading cycles shifts below the same dependence for initial stress range 605 MPa. The indicated inversion from the general law could be due to the fact that the strain range at 740 MPa in the first cycle is 8.7% that exceeds the maximum strain under which the pseudoelastic effect is still visible. With an increase of the stress range from 509 MPa to 748 MPa, the reversible strain increases from 3.7% to 7.7% in the first cycle. Regardless of the stress range, for each stress ratio there were separate dependences of the effective Young's modulus of NiTi alloy on the residual strain. With both stress ratios, there was observed a decrease in the current effective elasticity modulus with an increase of the residual strain. The increase of the stress ratio from 0 to 0.5 leads to the significant shift to the right. In particular, the residual strain at stress ratio equals to 0.5 is around two times larger the value of residual strain at stress ratio equals to 0 at the same effective elasticity modulus.

Keywords: pseudoelastic NiTi alloy, stress ratio, module of elasticity.

Вступ

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) є функціональними матеріалами, які характеризуються ефектом пам'яті форми і надпружністю. В основі цих ефектів лежить явище зворотного мартенситного перетворення. Завдяки цим властивостям та їх біосумісності вони широко застосовуються в медицині, біоінженерії, аерокосмічній, машинобудівній, будівельній та інших галузях [1–3]. Для псевдопружних СПФ крім механічної втоми необхідно також знати як змінюються функціональні властивості під дією циклічного навантаження, зокрема це відновлювана та залишкова деформація, дисипована енергія, модуль пружності аустеніту, коефіцієнт демпфування. На рис. 1 представлено схематично діаграму деформування псевдопружного сплаву при навантаженні і розвантаженні, яка характеризується напруженням початку σ^{Ms} і завершення σ^{Mf} аустенітно-мартенситної трансформації; початку σ^{As} і завершення σ^{Af} мартенситно-аустенітної трансформації; модулем пружності аустеніту E_A і

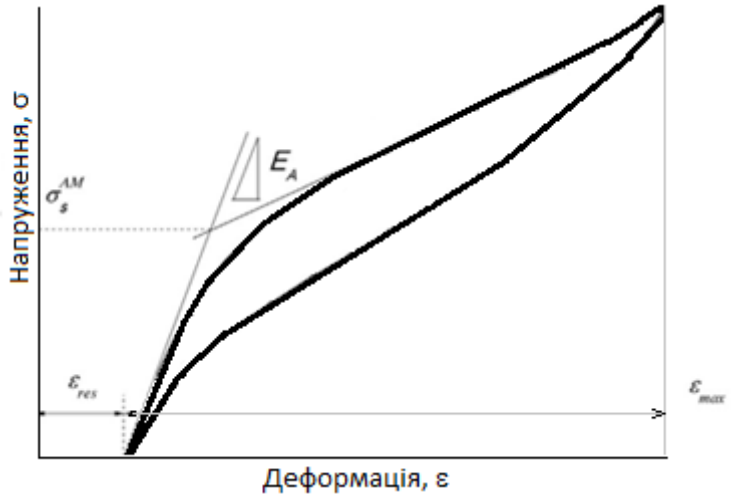


Рис. 1. Діаграма деформування псевдопружного сплаву при навантаженні і розвантаженні

мартенситу E_M ; залишковою ε_{res}, оборотною ε_{rec} і пружною деформаціями ε_e [4].

Відомо, що пружно-пластичне деформування матеріалу супроводжується ростом та об'єднанням розсіяних по об'єму тіла мікротріщин та пор, що призводить до зниження фізико-механічних властивостей матеріалу, виникнення макротріщини та викликає подальше руйнування конструкції. Вплив цього явища на поведінку матеріалу описують через параметр пошкоджуваності, який враховує зміну площі поперечного перерізу за рахунок мікродефектів [5].

Оскільки безпосереднє визначення ефективної площі поперечного перерізу є складною, було запропоновано визначати рівень пошкодження матеріалу за допомогою зміни величини його чутливих характеристик. Розсіяне пошкодження матеріалу під час експлуатації, зокрема втомне, може бути описане через зміну модуля пружності першого роду. Так, авторами було запропоновано ввести параметр пошкодження як відношення модулів пружності при розвантаженні до їх початкового значення [5–7].

Важливою характеристикою матеріалу є модуль пружності аустеніту. Під дією циклічного навантаження початковий модуль пружності збільшується внаслідок збільшення поряд із аустенітом об'єму стабілізованого мартенситу. Композитний матеріал, який складається із аустеніту і стабілізованого мартенситу характеризується так званим ефективним модулем пружності, значення якого буде знаходитися в межах між модулем пружності аустеніту і модулем пружності мартенситу $E_A < E_{ef} < E_M$. Вплив циклічного навантаження та амплітуди деформації на модуль пружності аустеніту зазначається в працях [8], [9], [10]. Зокрема, при збільшенні максимальних дотичних напружень при повністю реверсному крученні порожнинного валу з NiTi сплаву з 50.8 at% Ni, модуль пружності аустеніту, за сумірних значень кількості циклів навантаження зменшується [8]. Подібну закономірність впливу розмаху напруження (Δσ = 257, 315, 405 і 450 МПа) за одновісного розтягу на січний модуль пружності E_A отримано для нітинолу композиції 55,88% Ni при температурі випробувань 22°C (A_f =21,4 °C) [10]. Варіація механічних властивостей, зокрема і модуля пружності аустеніту нітинолу, визначених на різних зразках пояснюється відмінностям текстури, температури трансформації, і виділеннями (преципітатом), що може бути результатом незначних змін у хімічному складі і / чи технології термообробки [11]. Важливим з точки зору побудови і обґрунтування критеріїв втомного руйнування сплавів з пам'яттю форми є виявлення взаємозв'язку між функціональними властивостями сплаву при циклічному навантаження, зокрема із залишковою деформацією. Зазначається [12], що залишкова деформація псевдопружного сплаву з пам'яттю форми складається із пластичної деформації (~79%), яка має дислокаційну природу і реверсивної деформації (~21%) пов'язаної із залишковим мартенситом.

Метою даної роботи є дослідити вплив асиметрії циклу навантаження на модуль пружності аустеніту псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми і його взаємозв'язок із залишковою деформацією.

Методика експериментального дослідження і матеріал

Вплив асиметрії циклу навантаження на втомну довговічність $Ni_{55.8}Ti_{44.2}$ сплаву досліджували на циліндричних зразки, вирізаних із стрижня діаметром 8 мм. Циліндричні зразки діаметром 4 мм і довжиною робочої ділянки 12.5 мм випробовували за одновісного циклічного навантаження при температурі 0 °C і коефіцієнті асиметрії циклу навантаження $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0$ і $R = 0,5$ на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 [13] з автоматизованою системою управління та збору даних (тут σ_{min} і σ_{max} - мінімальні та максимальні напруження). Форма циклу синусоїдальна, частота навантаженням 0,5 Гц.

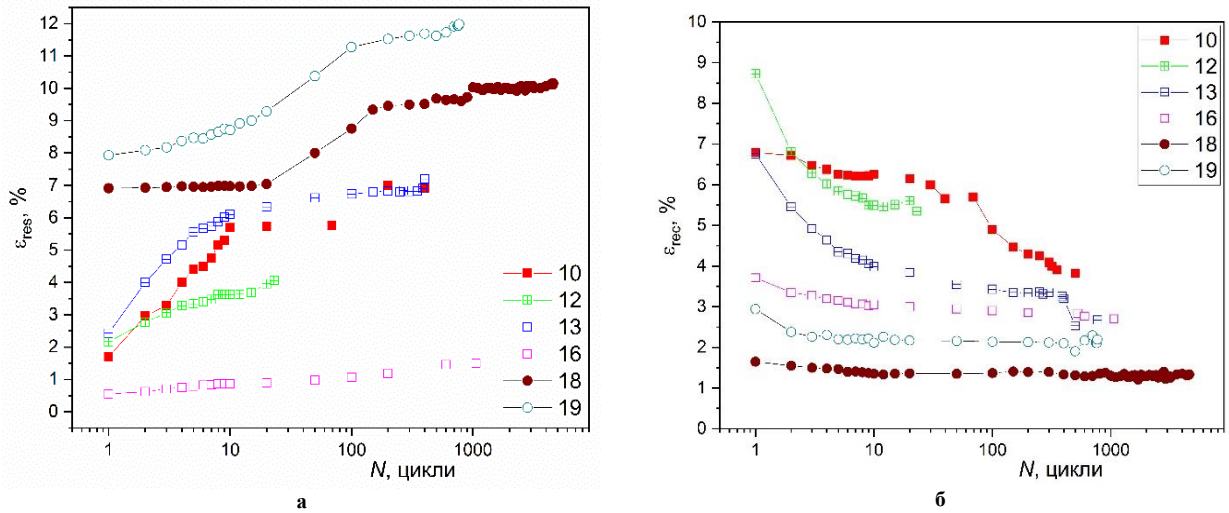
Досліджували вплив максимального напруження і асиметрії циклу навантаження на модуль пружності аустеніту псевдопружного $Ni_{55.8}Ti_{44.2}$ сплаву з пам'яттю форми при температурах 0°C, яка перевищувала температуру завершення аустенітного перетворення (A_f = – 38.7°C) .

Характеристики механічних властивостей сплаву при 0°C: напруження початку аустенітно-мартенситного перетворення σ_s^{AM} = 447 МРа, межа міцності σ_{UTS} = 869 МРа [13,14].

Результати та їх обговорення

На рис. 2 подано залежність залишкової (а) та оборотної деформації (б) NiTi сплаву від кількості циклів навантаження. Зі збільшенням кількості циклів навантаження залишкова деформація зростає. Збільшення початкового розмаху напружень від 509 МПа до 605 МПа збільшує залишкову деформацію. Проте подальше збільшення початкового розмаху напружень до 748 МПа зменшує залишкову деформацію за однакової кількості циклів навантаження. Вказана інверсія із загального закону обумовлена тим, що при $\Delta\sigma_1$ = 748 МПа в першому циклі, максимальна деформація дорівнює 8,7%, що перевищує максимальне значення деформації, при якій все ще проявляється ефект надпружності. Зі збільшенням коефіцієнта асиметрії циклу R від 0 до 0,5 залишкова деформація значно збільшується в першому та наступних циклах навіть при менших значеннях розмаху напружень.

Зі збільшенням розмаху напружень від 509 МПа до 748 МПа оборотна деформація у першому циклі зростає з 3,7% до 7,7%. Оборотна деформація значно менша при R = 0,5 (часткове розвантаження), ніж при випробуваннях з повним розвантаженням (R = 0), хоча ця різниця зменшується зі збільшенням кількості циклів навантаження. Слід зазначити, що різниця між оборотною деформації за різних значень розмаху напружень також зменшується зі збільшенням кількості циклів навантаження.



а б

Рис. 2. Залежності залишкової деформації – а та оборотної деформації – б від кількості циклів до руйнування NiTi сплаву $\Delta\sigma_1$ = 509 МПа (16), 530 МПа (13), 605 МПа (10), 748 МПа (12) при R = 0, $\Delta\sigma$ = 243 МПа (18), 305 МПа (19) при R = 0,5

На рис. 3 подано залежність поточного ефективного модуля пружності нітинолу при 0°С від залишкової деформації для різних значень розмаху напружень при коефіцієнті асиметрії $R_\sigma = 0 i 0,5$. Загалом спостерігається тенденція до зменшення ефективного модуля пружності псевдопружного NiTi сплаву із збільшенням залишкової деформації.

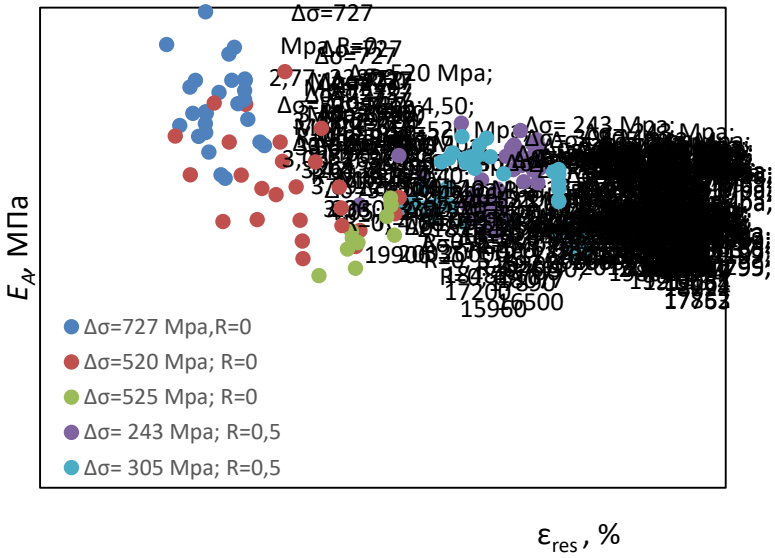


Рис. 3. Залежність ефективного модуля пружності псевдопружного нітинолу при температурі 0°С від залишкової деформації при $R_\sigma = 0 \; i 0,5$ та різних значення розмаху напруження

Вищевказані дані (Рис. 3) згруповані на рис.4 окремо для кожної асиметрії циклу навантаження. Незалежно від розмаху напруження, з урахуванням певного розкиду, для кожної асиметрії циклу ($R_\sigma = 0 i 0,5$) існують окремі залежності ефективного модуля пружності від залишкової деформації (Рис.4). За обох асиметрій циклу навантаження із збільшенням залишкової деформації ефективний модуль Юнга NiTi сплаву зменшується. Збільшення коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0 до 0,5 призводить до значного зміщення вправо кривої $E_A - \lg \varepsilon_{res}$ Зокрема, за однакового ефективного модуля пружності NiTi сплаву залишкова деформація при $R_\sigma = 0,5$ приблизно удвічі перевищує значення ε_{res} при віднульовому циклі навантаження.

На основі аналізу табличних даних, отриманих в роботі [4] побудовані графічні залежності ефективного модуля пружності псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми (50,8% Ni - 49,2% Ti) від залишкової деформації (Рис. 5) і від оборотної деформації (Рис. 6). На ділянці стабілізації при випробуванні в умовах контрольованої максимальної деформації, із збільшенням залишкової деформації, ефективний модуль пружності, зменшується (Рис. 5). Подібна закономірність зміни ефективного модуля пружності зазначеного NiTi сплаву на ділянці стабілізації спостерігається також при збільшенні оборотної деформації

(Рис. 6).

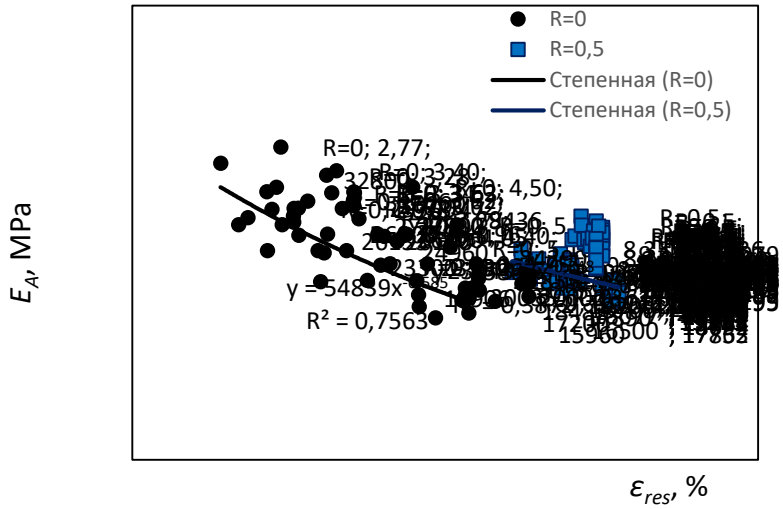


Рис. 4. Залежність модуля пружності аустеніту псевдопружного нітинолу при температурі 0°С від залишкової деформації при $R_\sigma = 0$ і $0,5$. Експеримент і апроксимація

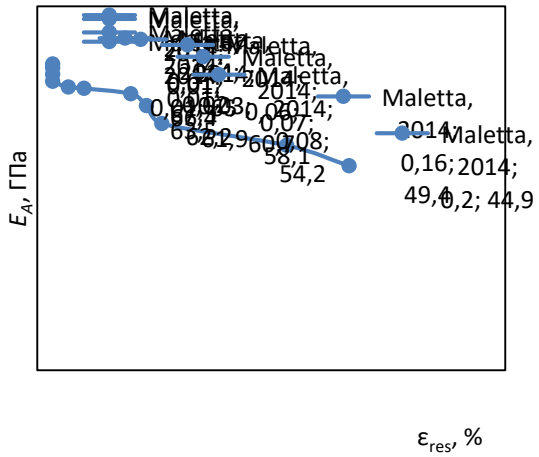


Рис. 5. Залежність ефективного модуля пружності аустеніту від залишкової деформації. За даними [4]

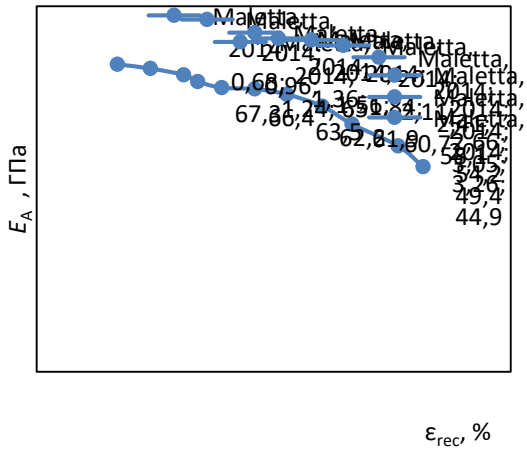


Рис. 6. Залежність ефективного модуля пружності аустеніту від оборотної деформації. За даними [4]

Відомі критерії втомного руйнування основані на питома енергія пружної деформації, яка визначається за формулою

$$W_e = \frac{\sigma_{max}^2}{2E_A},$$

Правомірність застосування вищезазначеного критерію дискутується в роботах [11]. Протиріччя виникає з огляду на те, що за однакового значення максимального напруження σ_{max} та різної асиметрії циклу навантаження розрахункові значення питомої енергії пружної деформації псевдопружного сплаву будуть співпадати, хоча втомна довговічність буде значно відрізнятися. Залежності ефективного модуля пружності від залишкової деформації при різній асиметрії циклу навантаження (Рис.3) пояснює вказане протиріччя. Втомне пошкодження, оцінюване через параметр питомої енергії пружної деформації, з урахуванням впливу асиметрії циклу навантаження на ефективний модуль пружності буде відрізнятися за різних значень *R*.

Висновки

1. Виявлено основні закономірності впливу амплітуди і асиметрії циклу навантаження на ефективний модуль Юнга псевдопружного NiTi сплаву з пам'яттю форми та його взаємозв'язок із іншими функціональними властивостями.

2. Незалежно від розмаху напруження, для кожної асиметрії циклу навантаження ($R_\sigma = 0 і 0,5$) існують окремі залежності ефективного модуля Юнга NiTi сплаву від залишкової деформації. При обох коефіцієнтах асиметрії циклу спостерігається зменшення поточного ефективного модуля пружності із

збільшенням залишкової деформації.

3. Збільшення коефіцієнту асиметрії циклу навантаження від 0 до 0,5 призводить до значного зміщення вправо кривої $E_A - \lg \varepsilon_{res}$ Зокрема, за однакового ефективного модуля пружності NiTi сплаву залишкова деформація при $R_\sigma = 0,5$ приблизно удвічі перевищує значення ε_{res} при віднульовому циклі навантаження.

Література

1. Yasniy P. et al. Calculation of constructive parameters of SMA damper // Sci. J. TNTU. 2017. Vol. 88, № 4. P. 7–15.

2. Nematollahi M. et al. Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: A Review // Bioengineering. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. Vol. 6, № 2. P. 37.

3. Mohd Jani J. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Mater. Des. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.

4. Maletta C. et al. Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading // Int. J. Fatigue. Elsevier, 2014. Vol. 66. P. 78–85.

5. Kachanov L.M. Introduction to Continuum Damage Mechanics. Bruukline USA.: Kluwer academic publishers. Printed in the Netherlands, 1986. 135 p.

6. Pirondi A., Bonora N. Modeling ductile damage under fully reversed cycling // Comput. Mater. Sci. Elsevier, 2003. Vol. 26, № January. P. 129–141.

7. Khan S. et al. Low cycle fatigue damage mechanism of the lightweight alloy Al2024 // Int. J. Fatigue. Elsevier, 2012. Vol. 38. P. 92–99.

8. Predki W., Klönne M., Knopik A. Cyclic torsional loading of pseudoelastic NiTi shape memory alloys: Damping and fatigue failure // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 417, № 1–2. P. 182–189.

9. Phillips F., Wheeler R.W., Lagoudas D.C. Damage evolution during actuation fatigue in shape memory alloys // Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII / ed. Naguib H.E. SPIE, 2018. Vol. 10596. P. 5.

10. Nayan N. et al. Unnotched fatigue behavior of an austenitic Ni-Ti shape memory alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2008. Vol. A 497. P. 333–340.

11. Mahtabi M.J., Stone T.W., Shamsaei N. Load sequence effects and variable amplitude fatigue of superelastic NiTi // Int. J. Mech. Sci. 2018. Vol. 148. P. 307–315.

12. Hua P. et al. Cyclic phase transformation behavior of nanocrystalline NiTi at microscale // Acta Mater. 2020. Vol. 185. P. 507–517.

13. Iasnii V. et al. Experimental study of pseudoelastic NiTi alloy under cyclic loading // Sci. J. TNTU. 2018. Vol. 92, № 4. P. 7–12.

14. Ясній В., Юнга Р. Фазові перетворення та механічні властивості сплаву нітинол з пам'яттю форми // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2018. Vol. 54, № 3. P. 107–111.

References

1. Yasniy P. et al. Calculation of constructive parameters of SMA damper // Sci. J. TNTU. 2017. Vol. 88, № 4. P. 7–15.

2. Nematollahi M. et al. Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: A Review // Bioengineering. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. Vol. 6, № 2. P. 37.

3. Mohd Jani J. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Mater. Des. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.

4. Maletta C. et al. Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading // Int. J. Fatigue. Elsevier, 2014. Vol. 66. P. 78–85.

5. Kachanov L.M. Introduction to Continuum Damage Mechanics. Bruukline USA.: Kluwer academic publishers. Printed in the Netherlands, 1986. 135 p.

6. Pirondi A., Bonora N. Modeling ductile damage under fully reversed cycling // Comput. Mater. Sci. Elsevier, 2003. Vol. 26, № January. P. 129–141.

7. Khan S. et al. Low cycle fatigue damage mechanism of the lightweight alloy Al2024 // Int. J. Fatigue. Elsevier, 2012. Vol. 38. P. 92–99.

8. Predki W., Klönne M., Knopik A. Cyclic torsional loading of pseudoelastic NiTi shape memory alloys: Damping and fatigue failure // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 417, № 1–2. P. 182–189.

9. Phillips F., Wheeler R.W., Lagoudas D.C. Damage evolution during actuation fatigue in shape memory alloys // Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII / ed. Naguib H.E. SPIE, 2018. Vol. 10596. P. 5.

10. Nayan N. et al. Unnotched fatigue behavior of an austenitic Ni-Ti shape memory alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2008. Vol. A 497. P. 333–340.

11. Mahtabi M.J., Stone T.W., Shamsaei N. Load sequence effects and variable amplitude fatigue of superelastic NiTi // Int. J. Mech. Sci. 2018. Vol. 148. P. 307–315.

12. Hua P. et al. Cyclic phase transformation behavior of nanocrystalline NiTi at microscale // Acta Mater. 2020. Vol. 185. P. 507–517.

13. Iasnii V. et al. Experimental study of pseudoelastic NiTi alloy under cyclic loading // Sci. J. TNTU. 2018. Vol. 92, № 4. P. 7–12.

14. Yasnii V., Yunha R. Fazovi peretvorennia ta mekhanichni vlastyvosti splavu nitynol z pamiattiu formy // Fizyko-khimichna mekhanika materialiv. 2018. Vol. 54, # 3. P. 107–111.

Надійшла / Paper received : 09.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-137-142
УДК 620.168.16

М.С. СТЕЧИШИН, В.П. ОЛЕКСАНДРЕНКО,
М.В. ЛУКЯНЮК, А.В. МАРТИНЮК, Ю.М. БІЛИК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА КОНТРОЛЕРА МОЛОКА ВРАЖЕНОГО МАСТИТОМ

У роботі проаналізована можливість випуску якісного молока готового до вживання в умовах фермерських господарств. Однією із головних проблем, що виникає в умовах даного виробництва являється своєчасне виявлення корів вражених маститом і відділення їхнього молока від основної маси продукту.

В роботі запропоновано проект контролера неперервної дії для оперативного неперервного контролю за надходженням молока враженого маститом і відведення його в окремий резервуар без зупинки процесу доїння. Робота пристрою базується на використанні однієї із фізичних властивостей молока, а саме його електропровідності, оскільки електропровідність молока враженого маститом в 2…2,5 рази вища ніж у здорового.

В роботі подана функціональна схема пристрою автоматичного розділення потоку молока. Конструктивно пристрій складається з двох частин – електричної і механічної. Електрична частина (контролер) складається з датчика, блокінг-генератора, підсилювача сигналу та електромагніта, як виконавчого органу. Механічна частина являє собою розподілювач, який приводиться в дію від електромагніта. Розподілювач виконує функцію перемикача потоку молока в молокопроводі.

Товщина струменя на віддалі 60…90 мм від корпуса колектора є постійною і залежить лише від інтенсивності виведення молока. Ця особливість використана при розробці конструкції кільцевого первинного перетворювача сигналу датчика наявності молока враженого маститом або закінчення доїння. Експериментальним шляхом знайдені діаметри і довжини кілець-електродів та зазор між ними.

Ключові слова: *автоматичне розділення потоку молока, молоко ,вражене маститом, електропровідність молока, кільцеві датчики.*

M.S. STECHYSHYN,V.P. OLEKSANDRENKO, M.V. LUKIANIUK,A. V. MARTYNIUK,Y. M.BILYK
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF MILK CONTROLLER AFFECTED BY MASTITIS

The paper analyzes the possibility of producing quality milk ready for consumption in the conditions of farms. One of the main problems that arises in the conditions of this production is the timely detection of cows affected by mastitis and the separation of their milk from the bulk of the product.

The paper proposes a project of a continuous controller for operational continuous control over the flow of milk affected by mastitis and its removal to a separate tank without stopping the milking process. The operation of the device is based on the use of one of the physical properties of milk, namely its electrical conductivity, because the electrical conductivity of milk affected by mastitis is 2 ... 2.5 times higher than that of healthy milk.

The article presents a functional diagram of the device for automatic separation of milk flow. Structurally, the device consists of two parts - electrical and mechanical. The electrical part (controller) consists of a sensor, a blocking generator, a signal amplifier and an electromagnet as an executive body. The mechanical part is a distributor that is driven by an electromagnet. The distributor acts as a switch of milk flow in the milk line.

The thickness of the jet at a distance of 60 ... 90 mm from the collector body is constant and depends only on the intensity of milk excretion. This feature is used in the design of the ring primary signal converter sensor for the presence of milk affected by mastitis or the end of milking. The diameters and lengths of the electrode rings and the gap between them were found experimentally.

Key words: automatic separation of milk flow, milk affected by mastitis, electrical conductivity of milk, ring sensors.

Вступ

Актуальність і необхідність удосконалення технології машинного доїння корів пояснюється, по-перше, тим, що серійні доїльні апарати не адаптовані до фізіологічних вимог лактуючих тварин, по-друге, відомо, що на долю доїння приходиться більше 60 % усіх трудозатрат [1] і 30 % встановленої потужності [2], по-третє, в колективних, фермерських и особистих господарствах лише 50 % операторів володіють технологією швидкісного машинного доїння тварин [3]. У зв'язку з цим, розробка і впровадження у виробництво стимулюючих молоковиділення технологій машинного доїння корів має важливе народно-господарське значення. Адже интенсивне і повне молоковиведення при кожному доїнні – обов'язкова фізіологічна вимога реалізації генетичного потенціалу молочної продуктивності тварин, а отже - зменшення захворюваності їх маститами, енерго і трудо затрат на технологічний процес доїння [1-3].

Аналіз джерел за темою досліджень

Якість молока залежить від багатьох факторів: від періоду лактації, породи, стану здоров'я, умов утримання, раціону годування та якості кормів, дотримання правил машинного доїння та первинної обробки молока [4,5].

Мастит субклінічної форми змінює біохімічний склад молока, зменшує кількість молочного цукру. Гостра форма маститу призводить до різкого зниження концентрації цінних компонентів в молоці. Воно має сольоноватий смак, в ньому містяться згустки гною та крові. Для харчових цілей таке молоко неприродне [6, 7].

Техніка доїння суттєво впливає на продуктивність корів, стан їх здоров'я і якість молока. При машинній технології отримання молока до робітників молочних ферм і комплексів висуваються жорсткі

вимоги, що до дотримання правил експлуатації техніки в умовах функціонування біотехнічної системи. Забезпечення швидкого та якісного видоювання корів – важливий фактор отримання конкурентоздатної молочної продукції.

Отримання молока високого санітарного ґатунку передбачає рішення комплексу питань: забезпечення тварин доброякісними кормами, вивільненими від шкідливих, токсичних речовин; чітке дотримання технології машинного доїння тварин; вдосконалення доїльного обладнання, зменшення довжини молокопроводів, використання доїльних апаратів з автоматичним відключенням, а також – установок з пристроями, що дозволяють промивати молокопроводи, з дотриманням, при необхідності; заходів з діагностики та профілактики маститу корів [7-9].

Постановка завдання

Розробка пристрою, що дозволяє здійснювати безперервний контроль молока в процесі доїння корів, діагностику і профілактику маститу корів при використанні доїльних апаратів з швидкодіючою автоматичною системою відключення після закінчення доїння.

Виклад основного матеріалу

До молока згідно ДСТУ 3662:2018 (Молоко-сировина коров'яче Технічні вимоги) висуваються вимоги за фізико-хімічними, органолептичними і санітарно-ветеринарними показниками. Молоко має бути натуральним, отримано від здорових корів, мати чистий, приємний, солодкуватий смак і запах.

Молоко корів хворих маститом, не підлягає реалізації. Незважаючи на те, що мастит не передається людині через молоко в ньому міститься велика кількість стафілококів, що виділяють токсини, які можуть викликати харчові отруєння і бути причиною небезпечного захворювання. Таким чином, перед господарствами, які планують випускати готову продукцію стоїть задача забезпечення жорсткого контролю за якістю молока [4].

Сучасний метод діагностики якості молока складається з 2-х етапів:

- перший – щоденний візуальний контроль якості молока. Перші струмені молока здоюються в переддійну чашу з наступним визначенням наявності пластівців, слизу, домішок крові в молоці;
- другий – щомісячна перевірка на наявність молока зараженого маститом, в спеціальних лабораторіях, або за допомогою експрес-тесту.

Проте, може бути застосований швидший і дешевший спосіб діагностики. Одна з фізичних властивостей молока – електропровідність, дозволяє відрізнити здорове молоко від хворого. Електропровідність здорового молока коливається від $40 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ до $50 \cdot 10^{-4} c^{-1}$, а у молока, отриманого від корів хворих маститом збільшується до $130 \cdot 10^{-4} c^{-1}$.

Вирішенням проблеми виявлення молока ураженого маститом, може бути розробка пристрою, який би дозволив здійснювати швидкий і безперервний контроль молока в процесі доїння корів [5, 6]. На рис. 1 показана примірна функціональна схема пристрою автоматичного розділення потоків молока на нормальне і молоко, вражене маститом.

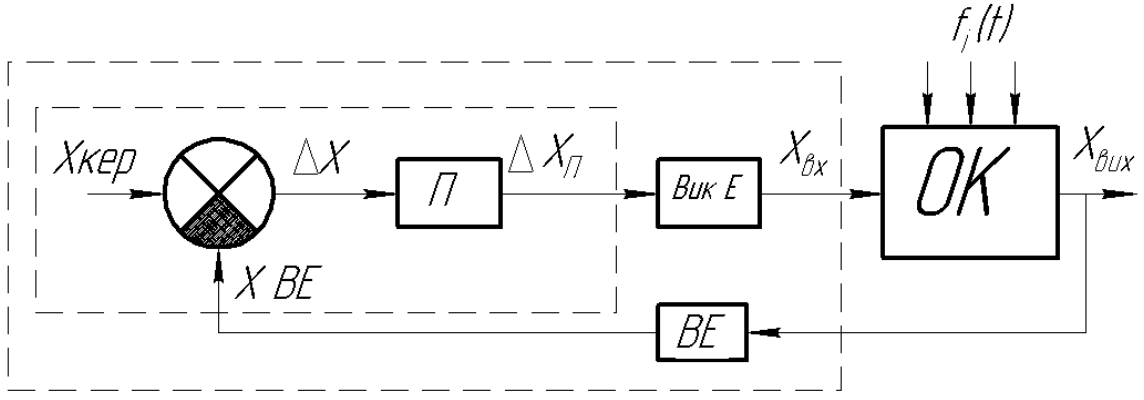


Рис. 1. Функціональна схема пристрою автоматичного розділення потоку молока. *ОК* – об'єкт керування, *ВЕ* – виміруючий пристрій, *П* – підсилюючий пристрій, Вик *Е* – виконуючий елемент, $X_{вих}$ – вихідний параметр, *Х ве* – вихідний параметр вимірюючого елемента, *Хкер* – керуючий параметр, *ΔХ* – вихідний параметр порівняльного елементуа, *ΔХп* – підсилений параметр, *Хвх* – вхідний параметр об'єкту керування, $f_i(t)$ – збурення

На функціональній схемі *ОК* – об'єкт керування, в нашому випадку – це розподілювач з електроприводом; *ВЕ* – виміруючий пристрій, датчик електропровідності молока; *П* – підсилювач; *Вик Е* – виконуючий елемент, електромагніт. $X_{вих}$ – це електропровідність молока в трубопроводі, де встановлений датчик. При появі в трубопроводі молока ураженого маститом змінюється його електропровідність, це вимірює виміруючий елемент *ВЕ*. $X_{ВЕ}$ – сигнал вимірюючого елемента, який поступає на вхід порівняльного пристрою і порівнюється з $X_{КЕР}$ керуючий, в даному випадку керуючий сигнал. Різниця $\Delta X = X_{КЕР} - X_{ВЕ}$ подається на вхід підсилювача, після якого підсилений сигнал $\Delta X_П$ подається на виконавчий елемент, *Вик Е*, тобто електромагніт розподілювача. Електромагніт, через шток, діє на розподілювач і переводить потік молока в бак враженого молока. $f_i(t)$ – збурення (випадкові фактори), які можуть мати вплив на процес

регулювання.

Конструктивно пристрій складається з двох частин – електричної і механічної. Електрична частина (контролер) складається з датчика, блокінг-генератора, підсилювача сигналу та електромагніта, як виконавчого органу. Механічна частина являє собою розподілювач, який приводиться в дію від електромагніта і його шток може займати дві позиції. Розподілювач виконує функцію перемикача потоку молока в молокопроводі [10, 11]. У вихідному положенні (електромагніт вимкнений) молоко поступає в основний бак зі здоровим молоком. При ввімкненому електромагнітному приводі розподілювач переводить потік молока в бак з враженим молоком. Схема електрична принципова пристрою представлена на рисунку 2, конструкція розподілювача потоку на рисунку 3.

Робота пристрою базується на вимірі електропровідності молока по змінному струму. Якщо в датчику звичайне молоко (нормальне), то електричний опір рідини досить високий (вище від ураженого маститом в 2,0...2,5 рази), при цьому не порушується умова самозбудження блокинг-генератора, виконаного на транзисторі VT1 і трансформаторі T1. Струм колектора протікає через резистор R2 і підвищує напругу на базі транзистора VT2. На емітері транзистора VT2 в цей час нижча напруга із-за падіння його на резисторах R5, R6. Тому транзистор VT2 виявляється закритим, струм в реле K1 не поступає. Контакти K1.1 замкнуті, напруга подається на контрольну лампу нормального молока H1.

При появі в молокопроводі молока з низьким електричним опором (анормальне молоко) генерація зривається, струм колектора транзистора VT1, що протікає через резистор R2, зменшується, зміщення бази транзистора VT2 зростає, транзистор переходить в режим насичення і реле K1 спрацьовує.

Контакти K1.1 розмикаються, напруга не подається на сигнальну лампу H1. Замикаються контакти K1.2, спрацьовує електромагніт V1, який приводить в дію розподілювач, останній перенаправляє потік молока враженого маститом в резервуар для збору анормального молока.

Після закінчення в молокопроводі анормального молока, контролер автоматично перенаправляє нормальне молоко в основний бак.

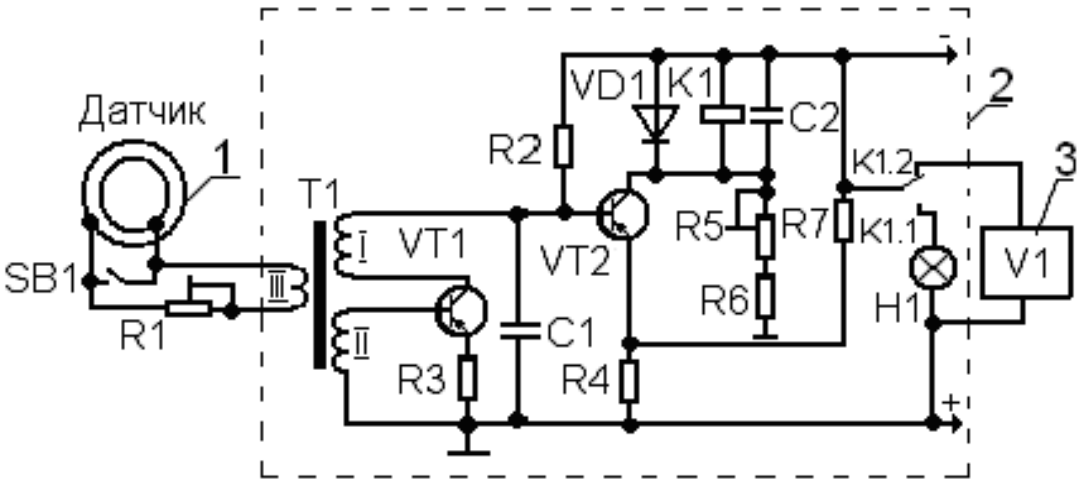


Рис. 2. Принципова електрична схема пристрою (у режимі роботи з молоком, ураженим маститом) : 1 - датчик; 2 - електронний блок; 3 - електромагніт

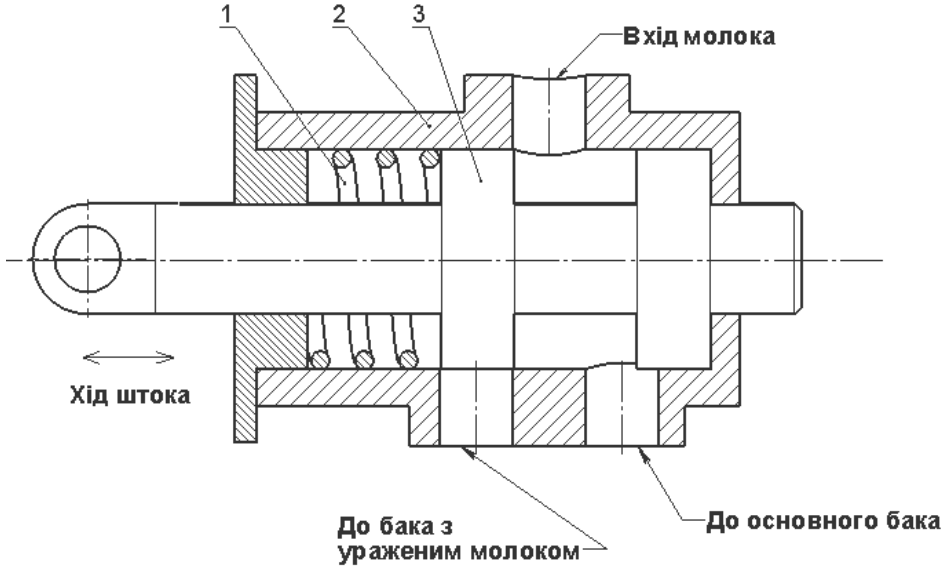


Рис. 3. Розподілювач молока: 1 – пружина; 2 – корпус; 3 – шток

Ефективність роботи контролера в повній мірі залежить від ефективності роботи датчика, яка обумовлюється його конструкцією. При розробці конструкції датчика враховувалися і гідродинаміка потоку молока в молокопроводі і фізичні властивості молока.

Встановлено, що при низькій інтенсивності виведення молока апаратом (до 400...500 г/хв) струминки при русі в колекторі розпадаються на частинки з утворенням двофазного повітряно-рідинного середовища, де дисперсною фазою є краплинки молока, а дисперсійною – оточуюче повітря. В колекторі доїльного апарата проходить поворот в русі суміші на 90° і потік починає рухатися горизонтально. Під дією відцентрової сили і удару об стінки колектора частина рідини знову утворює однофазне середовище, яке рухається по молокопроводу у вигляді суцільного неперервного струменя.

Товщина струменю на віддалі 60...90 мм від корпуса колектора є постійною і залежить лише від інтенсивності виведення молока. Ця особливість використана при розробці конструкції кільцевого первинного перетворювача сигналу - датчика наявності молока [12], а також для виявлення молока вираженого маститом (рис. 4).

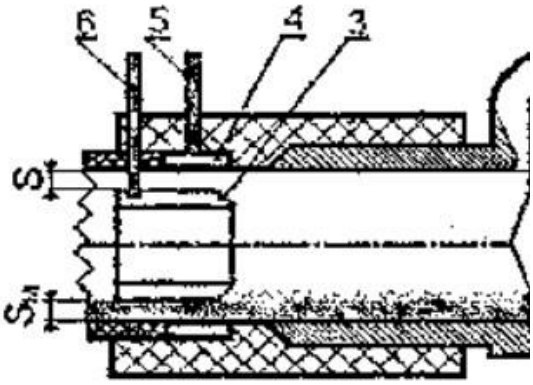


Рис. 4. Схема кільцевого датчика для вимірювання наявності та опору молока: 1 – суцільний струмінь молока; 2 – приграничний шар; 3 – внутрішнє кільце-електрод; 4 – зовнішнє кільце-електрод; 5, 6 – провідники

Первинний перетворювач сигналу складається з двох кільцевих електродів 3 и 4, встановлених концентрично із зазором і з'єднаних з блоком автоматики провідниками 5 и 6. Показник електричного опору датчика| залежить від відношення товщини суцільного шару молока $S_м$ і величини зазору S між кільцями-електродами. Якщо $S_м$>S, то зазор між кільцями завжди замкнутий частинками рідини, а опір між електродами незначний.

Зниження інтенсивності виведення молока зменшує товщину шару і при S_M<S електричний зв'язок між кільцями-електродами переривається. Електричний опір зростає в десятки разів порівняно з початковим (рис. 5). Співвідношення $S_м$ = S являється «критичним» і при певному значенні величини зазору між кільцями-електродами служить для дискретного контролю заданої інтенсивності виведення молока.

При роботі в режимі виявлення молока вираженого маститом, принцип роботи датчика залишається незмінним, але в даних умовах використовується можливості електронного блока контролера, який здатен фіксувати незначні зміни (електропровідність анормального молока вища в 2...2,5 рази в порівнянні з нормальним) і перенаправляти потік молока в інший бак.

На рис. 6 представлено взаємозв'язок зміни зазору між кільцями-електродами (за «критичними» точками) та величиною потоку молока. Встановлено, що інтенсивність виведення молока апаратом в інтервалі від 100 до 530 г/хв. придатна для дискретного контролю кільцевими перетворювачами сигналу. При більших значеннях потоку датчик слабо реагує на його перепади. Це дозволяє зробити висновок про придатність даного датчика для роботи з контролером молока вираженого маститом.

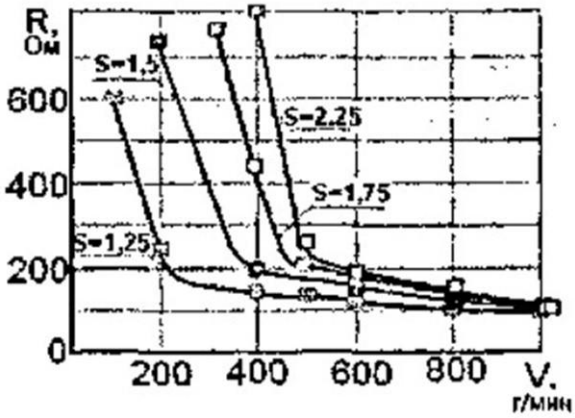


Рис. 5. Величина еквівалента електричного опору R датчика залежно від інтенсивності виведення молока V двотактним доїльним апаратом

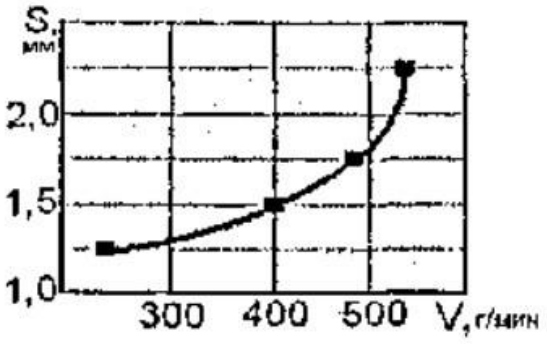


Рис. 6. Залежність зазору кілець-електродів від величини «критичної» інтенсивності V молока

На основі проведених досліджень розроблено конструктивні елементи датчика для виявлення молока вираженого маститом, рис. 7.

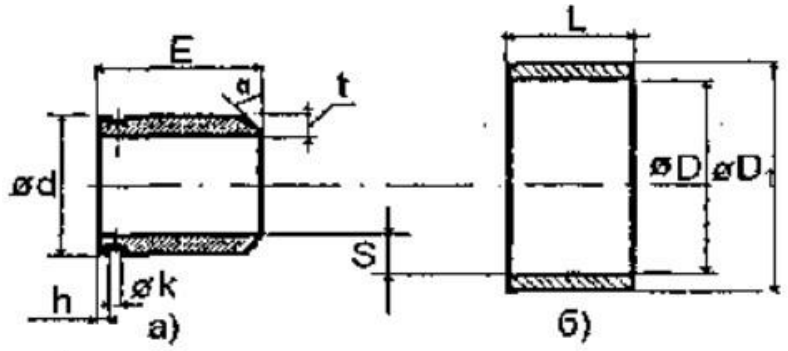


Рис. 7. Конструктивні параметри кілець-електродів: а - внутрішнє кільце; б - зовнішнє кільце

Для оцінки точності контролю інтенсивності виведення молока або початку відділення вираженого маститом молока при різних параметрах кілець-електродів у роботах [13, 14] вводиться поняття коефіцієнта стабільності F:

$$F = \frac{t_{всм} - (t_1 + t_2 + t_n)}{t_{всм}},$$

де $t_{всм}$ – загальний час всмоктування молока; t_1, t_2,t_n – періоди часу при яких проходило збільшення опору до значень «критичної зони». Залежність зміни коефіцієнта стабільності від ширини кілець-електродів представлена на рис. 8.

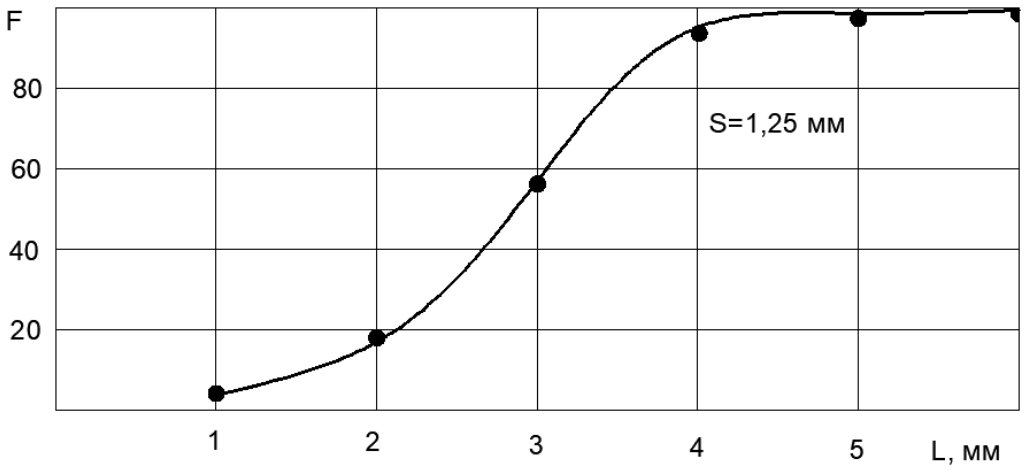


Рис. 8. Залежність зміни коефіцієнта стабільності від ширини кілець-електродів

Дослідження первинного перетворювача сигналу на доїльній площадці (з параметрами E = 7 мм, L = 5 мм, S = 1,25 мм) показали його високу ефективність. Точність контролю заданої інтенсивності виведення молока знаходилась в інтервалі ± 10% у 95% корів в стаді.

Висновки

Запропоновано конструкцію контролера для безперервного контролю молока в процесі доїння корів, діагностику і профілактику маститу корів при використанні доїльних апаратів з швидкодіючою автоматичною системою відключення після закінчення доїння.

Розроблено кільцевий первинний (перетворювач сигналу), обгрутовані параметри його конструкції по величині робочого зазору (1,25...2,5 мм) і ширині кілець-електродів (5...6 мм). В інтервалі потоку 200...550 г/хв датчик здатен здійснювати дискретний контроль заданої границі інтенсивності виведення молока з точністю ± 10, а також здійснювати контроль молока вираженого маститом і відведення його в резервний резервуар без зупинки процесу доїння корів.

Література

1. Сафиуллин, Н. А. Резервы повышения эффективности отрасли молочного скотоводства / Н.А. Сафиуллин, Р.А. Мухамедьяров. – Казань: ООО «Печатный двор», 2007. – 187 с.

2. Келпис, Э. А. Исследования перспективних технологий доения на молочных фермах кооперативных и фермерських хозяйств / Э. А. Келпис // VIII (I Всерос.) симп. по машинному доению с.-х. животных: тез. докл. – Оренбург, 1995. – С. 6-7.

3. Ганеев, А.А. Правила машинного доения коров в коллективных, фермерских и личных хозяйствах / А.А. Ганеев. – М.: ГОСНИТИ РАСХН, 2003. – 20 с.

4. Про молоко та молочні продукти: Закон України від 24 черв. 2004 р. № 1870–IV // Ефективне тваринництво. – 2006. – № 5. – С. 8-12.

5. Качество молока и молочных продуктов / Барабанщиков Н. В. – М.: Колос, 2000. – 255 с., ил.

6. Машкін, М. І. Технологія виробництва молока і молочних продуктів: підруч. / М. І. Машкін, Н. М. Париш; М-во аграрної політики України. – К.: Вища школа, 2006. – 351 с.

7. Про затвердження Правил ветеринарно-санітарної експертизи молока і молочних продуктів та вимог що до їх реалізації: Наказ ... від 20.04.2004 р. № 49 // Офіційний вісник України. – 2004. – № 19. – Ст. 1365.

8. Товароведение и экспертиза молока и молочних продуктов: Учеб. Пособие / Шепелев А. Ф., Кожухова О. И. – Ростов н/Д: Издат. центр «МарТ», 2001. – 128 с.

9. Админ Е. И. Доение коров на фермах промышленных комплексов. - Изд. 2-е, дополн. и перераб. - К.: Урожай, 2018. - 144 с.

10. Краусп В. Р. Комплексная автоматизация в промышленном животноводстве- М.: Машиностроение, 1980. - 214 с.

11. 11.Тенденции развития доильного оборудования за рубежом / (Ан. обзор.) Цой Ю. А., Мишуров Н. П., Кирсанов В. В., Зеленцов А. И. - М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2000.-76 с.

12. Устройство для контроля начала и окончания доения коровы: А.с.1212385 СССР / М..Л. Гордиевских. - 3784751/28 -12; Заявл. 21.06.84/ Открытия. Изобретения. -1986. -№7.

13. Курак А. С. Технологические основы машинного доения и контроль качества молока. – Минск: Белпринт, 2009.-160 с.

14. Гордиевских М. Л. Сравнительная оценка результатов испытаний доильного аппарата с прибором контроля и регулирования процесса выведения молока с аппаратами типа АДУ-1 и АДС// Механизация процессов в животноводстве. – Алма-Ата: Восточное отделение ВАСХНИЛ, 1989. – С.15- 23.

References

1. Safyullyn, N. A. Rezervы povыshenyia эffektyvnosty otrasly molochnoho skotovodstva / N.A. Safyullyn, R.A. Mukhamediarov. – Kazan: OOO «Pechatnыi dvor», 2007. – 187 s.

2. Kelpys, Э. A. Yssledovanyia perspektyvnykh tekhnolohyi doenyia na molochnыkh fermakh kooperatyvnыkh y fermerskykh khoziaistv / Э. A. Kelpys // VIII (I Vseros.) symp. po mashynnomu doenyiu s.-kh. zhyvotnыkh: tez. dokl. – Orenburh, 1995. – S. 6-7.

3. Haneev, A.A. Pravyla mashynnoho doenyia korov v kollektyvnыkh, fermerskykh y lychnыkh khoziaistvakh / A.A. Haneev. – M.: HOSNYTY RASKhN, 2003. – 20 s.

4. Pro moloko ta molochni produkty: Zakon Ukrainy vid 24 cherv. 2004 r. № 1870–IV // Efektyvne tvarynnytstvo. – 2006. – № 5. – S. 8-12.

5. Kachestvo moloka y molochnыkh produktov / Barabanshchykov N. V. – M.: Kolos, 2000. – 255 s., yl.

6. Mashkin, M. I. Tekhnolohiia vyrobnytstva moloka i molochnykh produktiv: pidruch. / M. I. Mashkin, N. M. Parysh; M-vo ahrarnoi polityky Ukrainy. – K.: Vyshcha shkola, 2006. – 351 s.

7. Pro zatverdzhennia Pravyl veterynarno-sanitarnoi ekspertyzy moloka i molochnykh produktiv ta vymoh shcho do yikh realizatsii: Nakaz ... vid 20.04.2004 r. № 49 // Ofitsiinyi visnyk Ukrainy. – 2004. – № 19. – St. 1365.

8. Tovarovedenye y эkspertyza moloka y molochnykh produktov: Ucheb. Posobye / Shepelev A. F., Kozhukhova O. Y. – Rostov n/D: Yzdat. tsentr «MarT», 2001. – 128 s.

9. Admyn E. Y. Doenye korov na fermakh promыshlennыkh kompleksov. - Yzd. 2-e, dopoln. y pererab. - K.: Urozhai, 2018. - 144 s.

10. Krausp V. R. Kompleksnaia avtomatyzatsyia v promыshlennom zhyvotnovodstve- M.: Mashynostroenye, 1980. - 214 s.

11. 11.Tendentsyy razvytyia doylnoho oborudovanyia za rubezhom / (An. obzor.) Tsoi Yu. A., Myshurov N. P., Kyrsanov V. V., Zelentsov A. Y. - M.: FHNU «Rosynformahrotekh», 2000.-76 s.

12. Ustroistvo dlia kontrolia nachala y okonchanyia doenyia korovы: A.c.1212385 SSSR / M..L. Hordyevskykh. - 3784751/28 -12; Zaiavl. 21.06.84/ Otkrытyia. Yzobretenyia. -1986. -№7.

13. Kurak A. S. Tekhnolohycheskye osnovы mashynnoho doenyia y kontrol kachestva moloka. – Mynsk: Belprynt, 2009.-160 s.

14. Hordyevskykh M. L. Sravnytelnaia otsenka rezultatov yspытanyi doylnoho apparata s pryborom kontrolia y rehulyrovanyia protsessa vыvedenyia moloka s apparatamy typa ADU-1 y ADS// Mekhanyzatsyia protsessov v zhyvotnovodstve. – Alma- Ata: Vostochnoe otdelenye VASKhNYL, 1989. – S.15- 23.

Надійшла / Paper received : 02.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-143-149
УДК 621.924.7

М.Г. ЗАЛЮБОВСЬКИЙ, В.В. МАЛИШЕВ
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
І.В. ПАНАСЮК
Київський національний університет технологій та дизайну

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНО ВИЗНАЧЕНОГО ПРОСТОРОВОГО ШАРНІРНОГО МЕХАНІЗМУ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Розглянуто просторовий шестиланковий механізм машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості. Дана машина може використовуватися для галтувальних процесів обробки металевих та полімерних деталей, а також для змішування сипких дрібнодисперсних речовин. Ступінь рухомості такого механізму рівний нулю. У кінематичному ланцюзі такого механізму наявним є надлишковий зв'язок. Надлишковий зв'язок негативно впливає на довговічність та експлуатаційні характеристики механізму, конструкція машини може функціонувати лише при забезпеченні високої точності довжин ланок просторового механізму. Авторами запропонований один з можливих способів звільнення просторового механізму машини від надлишкового зв'язку. На основі структурного синтезу розроблено конструкцію статично визначеного семиланкового просторового шарнірного механізму з додатковою рухомою ланкою. Проведені аналітичні дослідження основних геометричних параметрів машини. Встановлено взаємозв'язок між різними геометричними параметрами просторового семиланкового механізму, що дає можливість визначати раціональні співвідношення довжин ланок механізму. Розроблено спеціальну конструкцію приводу, що дозволяє реалізувати обертання ведучого валу машини з одночасним зворотно-поступальним переміщенням, отримані математичні залежності для розрахунку основних конструктивних параметрів приводу з метою забезпечення кутів тиску в кінематичній парі повзун-напрямна в допустимих межах. Отримані математичні залежності можуть бути використані відповідними машинобудівними підприємствами на стадії проектування галтувальних типів обладнання з ємкостями, що виконують складний просторовий рух.

Ключові слова: *надлишковий зв'язок, просторовий механізм, робоча ємкість, ступінь рухомості, статично визначений механізм.*

M.G. ZALYUBOVSKYI, V.V. MALYSHEV
Open International University of Human Development "Ukraine"
I.V. PANASYUK
Kyiv National University of Technology and Design

SYNTHESIS AND RESEARCH OF STATICALLY DETERMINED SPATIAL HINGED MECHANISM OF THE HOLDING MACHINE

The spatial six-link mechanism of the machine with complex spatial movement of the working capacity is considered. This machine can be used for shredding processes of processing of metal and polymeric details, and also for mixing of loose fine substances. The degree of mobility of such a mechanism is zero. In the kinematic circuit of such a mechanism, there is an excess connection. Excessive communication has a negative effect on the durability and performance of the mechanism, the design of the machine can function only with high accuracy of the lengths of the links of the spatial mechanism. The authors proposed one of the possible ways to free the spatial mechanism of the machine from excessive communication. Based on the structural synthesis, the design of a statically defined seven-link spatial hinge mechanism with an additional movable link has been developed. Analytical researches of the basic geometrical parameters of the car are carried out. The relationship between different geometric parameters of the spatial seven-link mechanism is established, which makes it possible to determine the rational ratios of the lengths of the links of the mechanism. A special drive design has been developed to realize the rotation of the drive shaft of the machine with simultaneous reciprocating movement, mathematical dependences are obtained to calculate the main design parameters of the drive to ensure pressure angles in the kinematic pair slider-guide within acceptable limits. The obtained mathematical dependences can be used by the relevant machine-building enterprises at the stage of designing galvanizing types of equipment with tanks performing complex spatial motion.

Key words: *redundant communication, spatial mechanism, working capacity, degree of mobility, statically defined mechanism.*

Постановка задачі. Вперше на території Радянського Союзу, на міжнародній хімічній виставці в Москві, у 1966 році було представлено розробку швейцарської фірми Willy A. Bachofen (WAB) [1] – базову конструкцію машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості. Призначалася така машина для виконання процесів змішування [2, 3] сипких дрібнодисперсних речовин. Починаючи з 2013 року у Київському національному університеті технологій та дизайну (далі КНУТД) вперше було проведено ряд успішних досліджень [4] щодо можливості використання такого обладнання для виконання різного роду галтувальних технологічних операцій, зокрема: шліфування та полірування полімерних [5] та металевих виробів, відділення деталей від ливників [6], подрібнення, очищення металевих деталей від продуктів корозії тощо. При виконанні галтувальних технологічних операцій обробки деталей із використанням машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості було досягнуто значного збільшення продуктивності. Проведені дослідження показали актуальність використання такого обладнання для галтувальних технологічних операцій.

Базова конструкція машини зі складним рухом робочої ємкості, зі структурної точки зору, представляє собою статично шестиланковий просторовий механізм з обертальними кінематичними парами, який має суттєвий недолік – наявність в його структурі надлишкового зв'язку, який негативно впливає на

довговічність та експлуатаційні характеристики механізму. Відомо [7, 8], що такий механізм може функціонувати лише при дотриманні чітких конструктивних співвідношень довжин її ланок. Однак, під час роботи механізму, навіть при незначній деформації однієї з ланок, може виникнути його заклинювання, як наслідок, він одразу виходить з ладу. Крім того, деталі потрібно виготовляти за допусками з підвищеною точністю. За рахунок цього, собівартість такого обладнання значно підвищується, а термін експлуатації знижується.

Таким чином, однією з основних задач, що ставляться при проектуванні даного типу галтувального обладнання є синтез нових статично визначених та вдосконалення існуючих просторових механізмів, кінематичні ланцюги яких не містять надлишкових зв'язків, так званих, «раціональних» механізмів. Відомо [9, 10], що після звільнення просторових механізмів від пасивних зв'язків, навантаження в його кінематичних парах та ланках будуть визначатися лише силовою технологічною та динамічною взаємодією.

Аналіз досліджень та публікацій. В цілому, відомі багаточисленні приклади ліквідації статичних невизначеностей в різноманітних шарнірних механізмах. Проблемам розробки «раціональних» механізмів, зокрема, просторових механізмів з обертальними кінематичними парами, присвячені праці Л.Н. Решетова [11], а також С.Н. Кожевникова [12, 13]. Ця проблема лишається актуальною і на сьогоднішній день.

Авторами були синтезовані [14-16] різні конструкції просторових механізмів галтувальних машин без надлишкового зв'язку. Усі вони є актуальними для виконання різного роду технологічних операцій.

Зокрема, синтезовано механізм машин з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною [14] кінематичними парами. В результаті, із використанням однієї одиниці такого обладнання виникає можливість одночасно виконувати дві різні технологічні операції або одночасно обробляти дві партії різних деталей. Синтезований механізм машини [16], в якому ведений вал кінематично з'єднаний з повзуном, а повзун встановлений в станині з можливістю зворотно-поступально переміщення вздовж горизонтальної напрямної. На основі даного вдосконалення «базової» конструкції машини збільшується амплітуда коливань робочої ємкості. В результаті чого вирішується проблема, як статичної невизначеності, так й інтенсифікації процесу змішування речовин.

Розроблені авторами конструкції машин успішно впроваджені у промисловість України на основі ряду ліцензійних угод (ліцензійна угода №6-19 від 22.10.2019 між КНУТД та ПрАТ "Молнія" (м. Баришівка), ліцензійна угода №5-16 від 28.07.2016 між КНУТД та ТОВ "Поліпласт" (м. Львів), ліцензійна угода №3-16 від 06.06.2016 між КНУТД та ТОВ "Червоний Жовтень" (м. Фастів)).

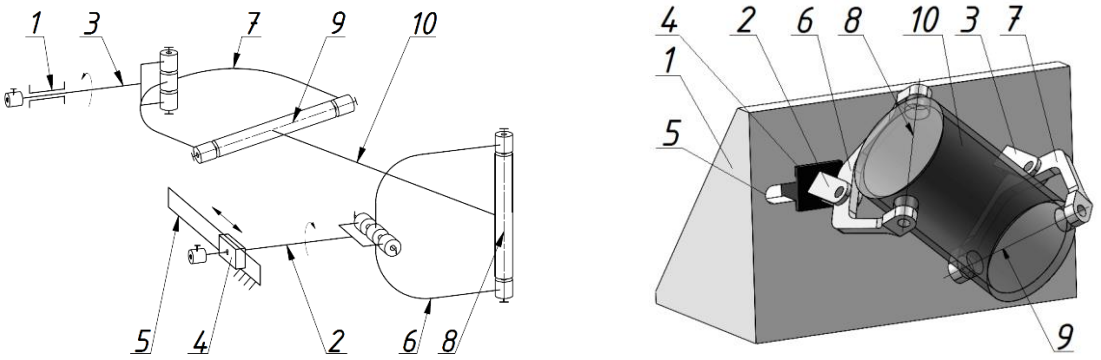
Виділення невирішених частин. Відомі різні шляхи звільнення просторових механізмів машин від надлишкового зв'язку. Однак, кожен з них має не лише свої переваги, але й недоліки. У синтезованому механізмі машин з двома робочими ємкостями [14, 15], у зв'язку з відмінними кінематичними параметрами переміщення обох робочих ємкостей, інтенсивність переміщення технологічного робочого середовища у двох ємкостях буде різною, що, в свою чергу, буде призводити до неможливості одночасно закінчити технологічну операцію у двох ємкостях машини. У синтезованому механізмі машини [16], в якому ведений вал кінематично з'єднаний з повзуном. розташування поступальної кінематичної пари «в кінці» кінематичного ланцюгу може призвести до концентрації динамічних нерівномірних навантажень на рухомі ланки машини, з часом викликати їх деформації. Потужність від приводу машини, яка необхідна для забезпечення можливості проковзування повзуна по напрямній, буде значно зменшена за рахунок її втрат на тертя у інших кінематичних парах машини тощо.

Таким чином, з усього вищесказаного можна зробити висновок, що подальша розробка різних варіантів просторових механізмів без надлишкового зв'язку машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Формулювання цілей. Метою даної роботи є варіант синтезу статично визначеного семиланкового просторового механізму галтувальної машини, у кінематичному ланцюзі якого виключено надлишковий (пасивний) зв'язок, аналітичні дослідження основних його геометричних параметрів, а також розробка спеціальної конструкції приводу, яка буде забезпечувати передачу обертального руху ведучого валу з одночасним його зворотно-поступальним переміщенням вздовж горизонтальної напрямної.

Виклад основного матеріалу. У роботі [8] достеменно розглянуто базову конструкцію машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості. Згідно формули Сомова-Малишева [17] для визначення ступеня вільності просторового механізму, встановлено, що, для даного просторового механізму, він рівний нулю. Механізми, у яких ступінь рухомості рівний нулю, вважаються непрацездатними. Однак, шестиланковий просторовий механізм «базової» конструкції галтувальної машини здатен функціонувати при забезпеченні чітких конструктивних співвідношень довжин його ланок, які отримані в роботах [7, 8]. Це пов'язано із наявністю у ньому надлишкового зв'язку.

Звільнитися від дії надлишкового зв'язку можна шляхом введення додаткової рухомої ланки у його кінематичний просторовий ланцюг. Таким чином, у якості додаткової рухомої ланки було використано повзун, який кінематично з'єднаний з ведучим валом машини та з можливістю зворотно-поступального переміщення вздовж горизонтальної напрямної встановлений у станині машини. Кінематична схема просторового шарнірного механізму представлена на рис. 1 (а), а модель такої машини на рис. 2 (б).



а *б*

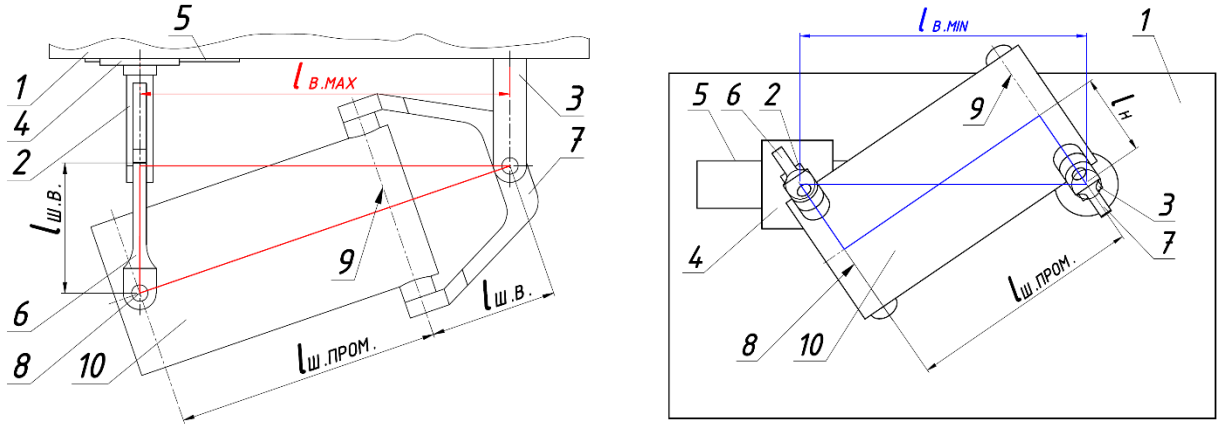
Рис. 1. Синтезований семиланковий статично визначений шарнірний механізм: а – кінематична схема, б – модель галтувальної машини

Просторовий механізм машини складається зі станини 1, ведучого 2 та веденого 3 валів, ведучого шатуна 6, веденого шатуна 7, проміжного шатуна 10, повзуна 4 та напрямної 5.

Ведучий вал 2 кінематично з'єднаний з повзуном 4, що також, рухомо встановлений в горизонтальній напрямній 5. Ведений вал 3 встановлений в підшипниковій опорі станини 1. Осі валів 2 та 3 паралельні між собою. Ведучий 2 та ведений 3 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучим шатуном 6 та веденим шатуном 7 відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі обертання 8 та 9 яких є вісями кріплення проміжного шатуна 10 (робочої ємкості). Така конструкція машини потребує одночасного обертання ведучого валу 2 з поєднанням його зворотно-поступального переміщення вздовж горизонтальної напрямної 5.

Аналітичне дослідження синтезованого просторового механізму машини починали, задаючись вихідними даними, зокрема, відповідними геометричними параметрами, які обираються в залежності від специфіки виконання технологічних операцій. Отже, міжосьова відстань ведучого та веденого шатунів – $l_{Ш.В.}$, міжосьова відстань проміжного шатуна – $l_{Ш.ПРОМ}$. Для даної конструкції машини має виконуватися умова $l_{Ш.ПРОМ.} > l_{Ш.В.}$.

Під час експлуатації такої машини, за рахунок утвореної поступальної кінематичної пари, відстань між паралельними осями валів буде циклічно змінюватися від мінімального $l_{B.MIN}$ до максимального $l_{B.MAX}$ значення. Максимальна відстань $l_{B.MAX}$ буде утворюватися при положеннях рухомих деталей (рис. 2 (а)), коли одна із осей ведучого чи веденого шатуна буде горизонтальною, а інша вертикальною. Мінімальна відстань $l_{B.MIN}$ буде виникати (рис. 2 (б)) в той час, як проміжний шатун машини проектуватиметься в натуральну величину на вертикальну площину станини.



а *б*

Рис. 2. Машина для обробки деталей: а – вид зверху, б – вид спереду

Амплітуду a зворотно-поступального переміщення повзуна разом із ведучим валом можна розрахувати наступним чином:

$$a = l_{B.MAX} - l_{B.MIN}. \quad (1)$$

На основі геометричної побудови, яка утворилася у положенні рухомих деталей машини, що представлено на рис. 2 (а), запишемо вираз для визначення максимальної відстані $l_{B.MAX}$:

$$l_{B.MAX} = \sqrt{(l_{Ш.В} + l_{Ш.ПРОМ})^2 - l_{Ш.В}^2}. \quad (2)$$

При положенні рухомих ланок, коли проміжний шатун (робоча ємкість) проектується на вертикальну площину в натуральну величину, відстань між геометричними взаємно перпендикулярними вісями кріплення ведучого та веденого шатунів буде мінімальною $l_{B.MIN}$. Вид спереду, при такому положенні

рухомих ланок машини, представлено на рис. 2 (б). l_{MIN} можна визначити наступним чином:

$$l_{B.MIN} = \sqrt{l^2_{Ш.ПРОМ.} + 4l^2_H}, \quad (3)$$

де l_H – відстань в проекції на вертикальну площину між віссю обертання веденого (ведучого) шатуна та віссю проміжного шатуна (робочої ємкості). Попередньо, у роботі [20] отримано вираз для визначення довжини l_H:

$$l_H = l_{Ш.В.} \cos 45^\circ. \quad (4)$$

Підставимо рівняння (4) у вираз (3), отримаємо:

$$l_{B.MIN} = \sqrt{l^2_{Ш.ПРОМ.} + 4(l_{Ш.В.} \cos 45^\circ)^2}. \quad (5)$$

Запишемо рівняння (1) з урахуванням отриманих виразів (2) та (5):

$$a = \sqrt{(l_{Ш.В} + l_{Ш.ПРОМ})^2 - l^2_{Ш.В}} - \sqrt{l^2_{Ш.ПРОМ.} + 4(l_{Ш.В.} \cos 45^\circ)^2}. \quad (6)$$

За виразом (6) можна розрахувати амплітуду a зворотно-поступального переміщення повзуна разом із ведучим валом.

Для того, щоб забезпечити обертання ведучого валу з одночасним його переміщенням разом із повзуном вздовж горизонтальної напрямної було розроблено спеціальну конструкцію механічного приводу, кінематична схема просторового механізму машини з технологічним приводом представлена на рис. 3.

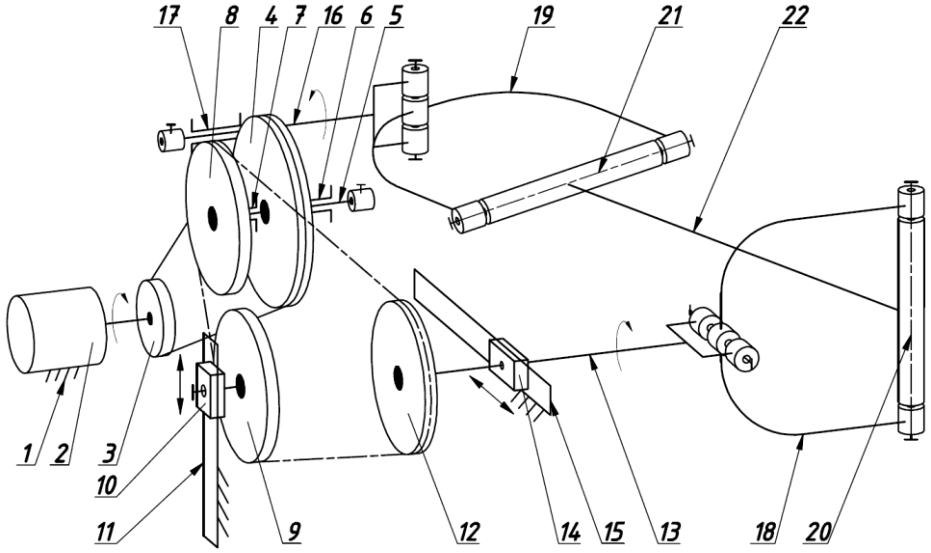


Рис. 3. Кінематична схема просторового механізму машини з технологічним приводом

На рис. 3 представлено: 1 – станина; 2 – електродвигун; 3, 4 – шківи пасової передачі; 5 – головний фіксований вал; 6, 7 – підшипникові опори головного фіксованого валу; 8 – нерухома зірочка; 9 – додаткова рухома зірочка; 10 – повзун приводу; 11 – вертикальна напрямна; 12 – рухома зірочка; 13 – ведучий вал; 14 – повзун; 15 – горизонтальна напрямна; 16 – ведений вал; 17 – опора веденого валу; 18 – ведучий шатун; 19 – ведений шатун; 20, 21 – вісі обертання ведучого та веденого шатунів; 22 – проміжний шатун (робоча ємкість).

Повзун приводу 10, а також повзун 14 за один оберт ведучого валу 13 виконують чотири зворотно-поступальні переміщення вздовж відповідних напрямних 11 та 15.

Зворотно-поступальне переміщення обох повзунів та ведучого валу фактично буде забезпечувати ланцюгова передача приводу. Кінематична схема ланцюгової передачі приводу представлена на рис. 4.

Виконували синтез представленої на рис. 4 частини приводу з метою отримання виразів для розрахунку раціональних геометричних параметрів, які будуть забезпечувати кут тиску γ в кінематичній парі повзун-напрямна у допустимих межах.

При положенні рухомих елементів ланцюгової передачі, що відповідає утворенню максимальної відстані a_{max}, у кінематичній парі повзун-напрямна буде виникати максимальне значення кута тиску γ_{max}.

Перед початком синтезу необхідно задаватися такими вихідними даними: γ_{max}; a_{max} – мінімальна відстань між нерухомою та рухомою зірочками; a – амплітуда зворотно поступального переміщення повзуна разом з веденою зірочкою.

Згідно представлених рекомендацій у роботі [18], що створюють умови для довговічної роботи шарнірних механізмів, максимальне значення кута тиску γ_{max} не повинно перевищувати 40º. Величину a попередньо можна розрахувати за отриманим виразом (6).

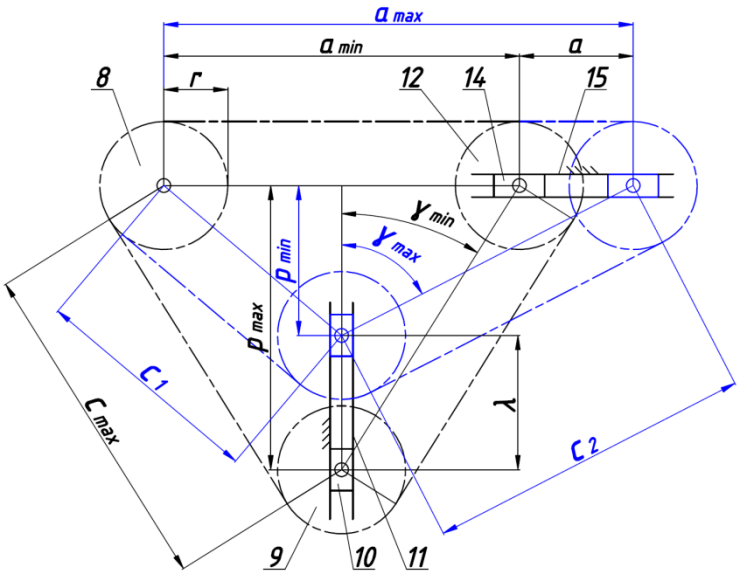


Рис. 4. Кінематична схема ланцюгової передачі приводу

Вираз для визначення максимального значення кута тиску γ_{max} буде мати вигляд:

$$\gamma_{\max} = arctg\frac{0{,}5\cdot a_{\min} + a}{p_{\min}}, \tag{7}$$

де p_{min} – мінімальна відстань між центром обертання додаткової рухомої зірочки та центром прямої a_{max}.

Виразимо із рівняння (7) p_{min} та запишемо із урахуванням виразу (6):

$$p_{\min} = \frac{0{,}5\cdot a_{\min} + a}{tg\gamma_{\max}}. \tag{8}$$

Вираз для визначення необхідної довжини ланцюга l ланцюгової передачі буде мати вигляд:

$$l = 2\pi r + a_{\min} + a + c_1 + c_2, \tag{9}$$

де r – радіус зірочок; c_1 – відстань між центром нерухомої зірочки та центром додаткової рухомої зірочки; c_2 – відстань між центром рухомої зірочки та додаткової рухомої зірочки у тому положенні, коли рухома зірочка займає крайнє праве положення.

Виходячи з геометричних міркувань запишемо вирази для визначення c_1 та c_2:

$$c_1 = \sqrt{0{,}25a_{\min}^2 + p_{\min}^2}. \tag{10}$$

$$c_2 = \frac{0{,}5\cdot a_{\min} + a}{\sin\gamma_{\max}}. \tag{11}$$

Рівняння (10) з урахуванням виразу (8) буде мати вигляд:

$$c_1 = \sqrt{0{,}25a_{\min}^2 + \left(\frac{0{,}5\cdot a_{\min} + a}{tg\gamma_{\max}}\right)^2}. \tag{12}$$

Запишемо рівняння (9) з урахуванням виразів (11)(2.160) та (12)(2.161):

$$l = 2\pi r + a_{\min} + a + \sqrt{0{,}25a_{\min}^2 + \left(\frac{0{,}5\cdot a_{\min} + a}{tg\gamma_{\max}}\right)^2} + \frac{0{,}5\cdot a_{\min} + a}{\sin\gamma_{\max}}. \tag{13}$$

Довжину ланцюга l також можна визначити іншим шляхом, виходячи з геометричної побудови рухомих елементів, що утворюється в той час, як рухома зірочка займає своє крайнє ліве положення:

$$l = 2\pi\kappa + a_{\min} + 2c_{\max}, \tag{14}$$

де c_{max} – відстань між центром нерухомої зірочки та центром додаткової рухомої зірочки, коли рухома зірочка займає крайнє ліве положення.

Запишемо рівняння (14), виразивши із нього c_{max}:

$$c_{\max} = \frac{l - 2\pi r - a_{\min}}{2}. \tag{15}$$

Запишемо вирази для визначення мінімального значення кута тиску γ_{min} кінематичній парі повзун-напрямна та максимальної відстані p_{max} між центром обертання додаткової рухомої зірочки та прямої a_{max}:

$$\gamma_{\min} = \arcsin\frac{0{,}5\cdot a_{\min}}{c_{\max}}. \tag{16}$$

$$p_{\max} = c_{\max} \cos\gamma_{\min}. \quad (17)$$

Вираз (17) з урахуванням (15) та (16) буде мати вигляд:

$$p_{\max} = \frac{l - 2\pi r - a_{\min}}{2} \cos\left(\arcsin \frac{0{,}5 \cdot a_{\min}}{c_{\max}} \right). \quad (18)$$

Для розрахунку p_{max} також актуальним буде наступний вираз:

$$p_{\max} = \sqrt{0{,}25((l - 2\pi r - a_{\min})^2 - a_{\min}^2}. \quad (19)$$

За отриманими виразами (18) та (19), з урахуванням відповідних геометричних параметрів, можна розрахувати максимальну відстань p_{max} між центром обертання додаткової рухомої зірочки та прямої a_{max}.

Висновки

1. Представлено один із можливих варіантів синтезу статично визначеного семиланкового просторового механізму галтувальної машини, у кінематичному ланцюзі якого виключено надлишковий зв'язок.

2. Виконані аналітичні дослідження семиланкового просторового механізму, на основі яких встановлено взаємозв'язок між різними геометричними параметрами просторового семиланкового механізму, що дає можливість визначати раціональні співвідношення довжин його ланок. Дані залежності можуть бути використані при подальшому проектуванні такого типу обладнання.

3. Розроблено спеціальну конструкцію приводу, що дозволяє реалізувати обертання ведучого валу машини з одночасним зворотно-поступальним переміщенням, отримані математичні залежності для розрахунку основних конструктивних параметрів приводу з метою забезпечення кутів тиску в кінематичній парі повзун-напрямна в допустимих межах.

Література

1. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. – 2020 [Електронний ресурс]. URL: https://www.wab-group.com/en/ (дата відвідування: 09.11.2020).

2. Marigo M. Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets / M. Marigo, EH Stitt // KONA Powder and Particle Journal – 2015. – No 32, P. 236-252.

3. Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis / Z. Yan, SK. Wilkinson, EH. Stitt, M. Marigo // Computational Particle Mechanics – 2014. – No 2. (Vol. 3), P. 283-299.

4. Залюбовський М. Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія / М. Г. Залюбовський, І. В. Панасюк, В. В. Малишев – К.: Університет «Україна», 2018. – 228 с.

5. Zalyubovskyi M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskyi M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. – Vol. 2. – P. 24 – 32.

6. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2020. – №1 (142). – С.

7. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрия и кинематика механизма турбулентного смесителя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. – С. 701–708.

8. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54 – 64.

9. E. Ya. Antonyuk. Dynamic system of an engine with spatially rocking links: a mathematical model / E. Ya. Antonyuk, V. A. Sakhamov, N. I. Koval // International Applied Mechanics, 46, No. 9, 2010, P. 1039 – 1049.

10. E. Ya. Antonyuk. Motion of an articulated vehicle with two-dimensional sections subject to lateral obstacles / E. Ya. Antonyuk, A. T. Zabuga // International Applied Mechanics, 52, No 4, 2016, P. 404-412.

11. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 256 с.

12. Кожевников С.Н. Основания структурного синтеза механизмов. – К.: Наук. думка, 1979. – 232 с.

13. Кожевников С.Н. Механизмы / С.Н. Кожевников, Я.И. Есипенко, Я.М. Раскин. – М.: Машиностроение, 1965. – 1060 с.

14. Патент №126647, МПК B01F 11/00 (2018.01). Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201801469; заяв. 15.02.2018, опуб. 25.06.2018, бюл. № 12.

15. Патент №127438, МПК B24B 31/00 (2018.01). Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну –

№u201803397; заяв. 30.03.2018, опуб. 25.07.2018, бюл. № 14.

16. Патент №89571, МПК B01F 11/00. Машина для обробки деталей / Панасюк І.В., Залюбовський М.Г., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201313728; заяв. 26.11.2013, опуб. 25.04.2014, бюл. № 8.

17. Артоболевский И.И. Теория машин и механизмов. – М.: Наука, 1988. – 640 с.

18. Пищиков В.О. Проектування швейних машин: навчальний посібник для ВНЗ за спеціальністю "Обладнання легкої промисловості та побутового обслуговування" / В.О. Пищиков, Б.В. Орловський – К.: Видавничо-поліграфічний дім "Формат". – 2007. – 320 с.

References

1. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. – 2020 [Електронний ресурс]. URL: https://www.wab-group.com/en/.

2. Marigo M. Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets / M. Marigo, EH Stitt // KONA Powder and Particle Journal – 2015. – No 32, P. 236-252.

3. Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis / Z. Yan, SK. Wilkinson, EH. Stitt, M. Marigo // Computational Particle Mechanics – 2014. – No 2. (Vol. 3), P. 283-299.

4. Zaliubovskyi M. H. Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkostei dlia obrobky polimernykh detalei: monohrafiia / M. H. Zaliubovskyi, I. V. Panasiuk, V. V. Malyshev – K.: Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.

5. Zalyubovskyi M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskyi M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. – Vol. 2. – P. 24 – 32.

6. Zaliubovskyi M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta ob'iemu zapovnennia yemkosti na intensyvnist viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2020. – №1 (142). – S. 27-38.

7. Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometriya i kinematika mehanizma turbulentnogo smesitelya // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2011. – S. 701–708.

8. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54 – 64.

9. E. Ya. Antonyuk. Dynamic system of an engine with spatially rocking links: a mathematical model / E. Ya. Antonyuk, V. A. Sakhamov, N. I. Koval // International Applied Mechanics, 46, No. 9, 2010, P. 1039 – 1049.

10. E. Ya. Antonyuk. Motion of an articulated vehicle with two-dimensional sections subject to lateral obstacles / E. Ya. Antonyuk, A. T. Zabuga // International Applied Mechanics, 52, No 4, 2016, P. 404-412.

11. Reshetov L.N. Konstruirovanie racional'nyh mehanizmov. – Izd. 2-e, pererabot. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 256 s.

12. Kozhevnikov S.N. Osnovaniya strukturnogo sinteza mehanizmov. – K.: Nauk. dumka, 1979. – 232 s.

13. Kozhevnikov S.N. Mehanizmyi / S.N. Kozhevnikov, Ya.I. Esipenko, Ya.M. Raskin. – M.: Mashinostroenie, 1965. – 1060 s.

14. Patent №126647, MPK B01F 11/00 (2018.01). Mashyna dlia obrobky detalei / Zaliubovskyi M.H., Panasiuk I.V., zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskyi natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu – №u201801469; zaiav. 15.02.2018, opub. 25.06.2018, biul. № 12.

15. Patent №127438, MPK B24V 31/00 (2018.01). Mashyna dlia obrobky detalei / Zaliubovskyi M.H., Panasiuk I.V., zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskyi natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu – №u201803397; zaiav. 30.03.2018, opub. 25.07.2018, biul. № 14.

16. Patent №89571, MPK B01F 11/00. Mashyna dlia obrobky detalei / Panasiuk I.V., Zaliubovskyi M.H., zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskyi natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu – №u201313728; zaiav. 26.11.2013, opub. 25.04.2014, biul. № 8.

17. Artobolevskiy I.I. Teoriya mashin i mehanizmov. – M.: Nauka, 1988. – 640 s.

18. Pischikov V.O. Proektuvannya shveynih mashin: navchalniy posIbnik dlya VNZ za spetsIalnIstyu "Obladnannya legkoYi promislovostI ta pobutovogo obslugovuvannya" / V.O. Pischikov, B.V. Orlovskiy – K.: Vidavnicho-polIgrafIchniy dIm "Format". – 2007. – 320 s.

Надійшла / Paper received : 03.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-150-154
УДК 621.01

С.О. КОШЕЛЬ, Г. В. КОШЕЛЬ
Київський національний університет технологій та дизайну

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ ТРЕТЬОГО КЛАСУ З СКЛАДНИМИ ЛАНКАМИ

Плоскі механізми третього класу дозволяють отримати складні траєкторії руху окремих точок ланок, що мають плоскопаралельний рух як за геометрією, так і за кінематичними законами руху, тому знайшли застосування в машинах технологічного обладнання легкої промисловості. З іншого боку, складність кінематичного дослідження таких механізмів обумовлена структурними особливостями будови кінематичної схеми з групами ланок третього класу, тому дозволяє стверджувати про актуальність робіт, спрямованих знаходити шляхи спрощення аналізу таких складних механізмів з одночасною оптимізацією часу, який витрачається на графічні побудови на основі залежностей кінематичних параметрів точок механізму, що в цілому впливає на достовірність та точність результатів дослідження. Розроблено послідовність та виконано кінематичне дослідження швидкостей точок ланок плоских механізмів графоаналітичним способом зі структурними групами ланок третього класу третього та четвертого порядків, до складу яких надходять складні за структурою ланки. Графоаналітичний спосіб дослідження в своїй основі базується на можливості для механізмів, в структурі яких спостерігаються складні ланки, що мають плоскопаралельний рух графічно визначити положення миттєвих центрів їх обертання та визначити кінематичні параметри руху таких ланок та механізму в цілому.

Ключові слова: *механізм; кінематичне дослідження графічним способом; вектор швидкості; план швидкостей.*

S.O. KOSHEL, A.V. KOSHEL
Kiev National University of Technologies and Design

KINEMATIC ANALYSIS OF THIRD CLASS PLANE MECHANISMS WITH COMPLEX LINKS

Flat mechanisms of the third class allow to obtain complex trajectories of individual points of links that have plane-parallel motion, both in geometry and in the kinematic laws of motion. Such mechanisms have found application in machines of technological equipment of light industry. The complexity of the kinematic study of such mechanisms is due to the structural features of the structure of the kinematic scheme with the structural groups of the third class. Relevant are the works aimed at finding ways to simplify the analysis of such complex mechanisms while optimizing the time spent on graphical constructions, which generally affects the accuracy of the research results. The sequence is developed and the kinematic research of velocities of points of links of the flat mechanism by a graphoanalytical way with structural groups of links of the third class of the third and fourth orders which include complex links. The graphoanalytical method of research is basically based on the possibility for mechanisms in the structure of which complex links are observed, to graphically determine the position of instantaneous centers of their rotation and to determine the kinematic parameters of such links and the mechanism as a whole.

Keywords: mechanism, graphic kinematic research; velocity vector; speed plan.

Вступ

Плоскі механізми третього класу дозволяють отримати складні траєкторії руху окремих точок ланок, що мають плоскопаралельний рух, як за геометрією так і за кінематичними законами руху, тому знайшли застосування в машинах технологічного обладнання легкої промисловості. Складність кінематичного дослідження таких механізмів обумовлена структурними особливостями будови кінематичної схеми з групами ланок третього класу, тому дозволяє стверджувати про актуальність робіт спрямованих знаходити шляхи спрощення аналізу таких складних механізмів з одночасною оптимізацією часу, який витрачається на графічні побудови на основі залежностей кінематичних параметрів точок механізму, що в цілому впливає на достовірність та точність результатів дослідження.

Постановка завдання

Виконати графоаналітичним способом кінематичні дослідження швидкостей точок ланок плоских механізмів з структурними групами ланок третього класу третього та четвертого порядків, до складу яких надходять складні за структурою ланки. Розробити послідовність кінематичного аналізу таких механізмів, взявши до уваги те, що для складних ланок, які мають плоскопаралельний рух та надходять до структурних груп ланок механізму можна графічно визначити положення миттєвих центрів їх обертання, що в свою чергу дозволяє виконати кінематичне дослідження швидкостей точок, які співпадають с геометричними центрами кінематичних пар механізму без необхідності складання векторних кінематичних рівнянь та їх графічного розв'язання.

Аналіз досліджень та публікацій

Питання дослідження складних механізмів вищих класів залишаються актуальними. В літературних джерелах їм приділяється всебічна увага. В роботах розглядаються питання синтезу та аналізу механізмів, до складу яких надходять структурні групи ланок вищих класів. Питанням синтезу складних механізмів присвячений ряд робіт останніх років [1, 2, 3]. Кінематичний аналіз механізмів вищого класу виконується дослідниками аналітично [4, 5], графоаналітично [6, 7, 8] або методом моделювання з використанням необхідного програмного забезпечення [9].

Оригінальний підхід кінематичного аналізу того чи іншого плоского механізму з складними структурними групами ланок полягає в тому, щоб для конкретного механізму використати або розробити таку послідовність проведення дослідження, яка б ураховувала структурні його особливості.

Формулювання цілей

Розрахувати кінематичні параметри кутових швидкостей ланок плоского механізму та лінійних швидкостей їх окремих точок графоаналітичним способом з структурними групами ланок третього класу третього та четвертого порядків, до складу яких надходять складні за структурою ланки.

Результати та їх обговорення

Розглянемо складні плоскі шарнірно-важільні механізми третього класу (рис. 1), що складаються з ведучої ланки 1, яка з'єднана з корпусом 0 та інших ланок, серед яких ланки 2, 3 (а); 2 ÷4 (б); 2, 3, 5 (в) – шатуни, інші ведені ланки – коромисла.

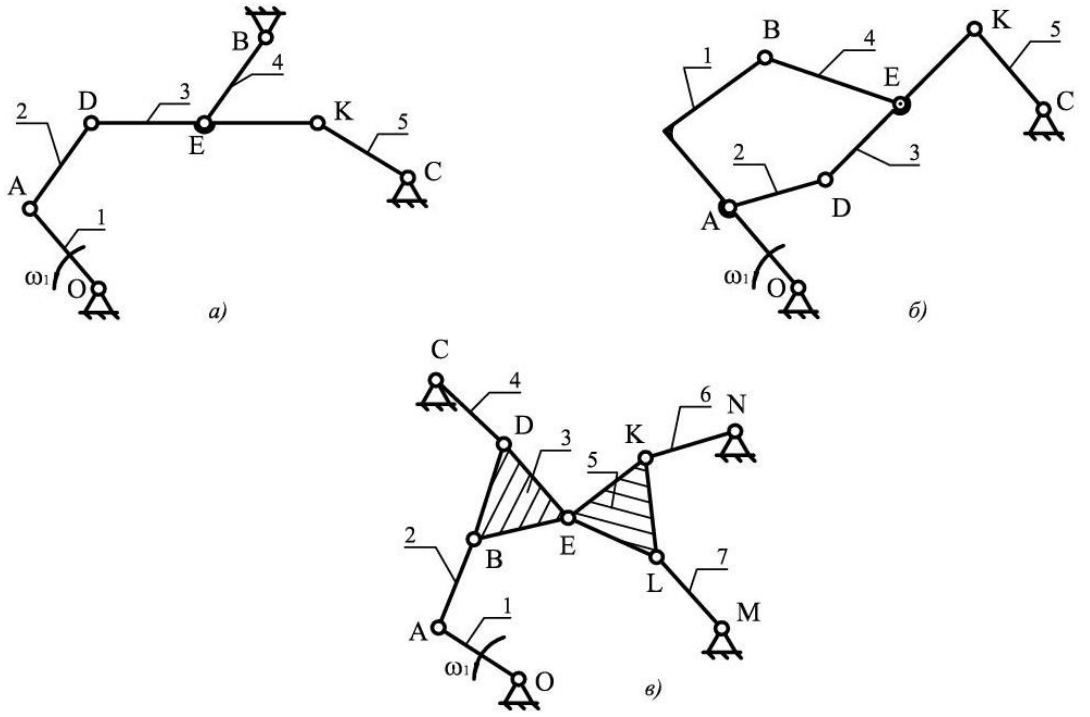


Рис. 1. Кінематичні схеми механізмів третього класу

Два з них (рис. 1 а, б) є механізмами третього класу з одним ведучим кривошипом та однією структурною групою ланок третього класу третього порядку, тому формула будови таких механізмів має однаковий вигляд:

$$1клас\ \ (ланки 0,1) \rightarrow 3клас\ \ 3порядок\ \ (ланки 2 \div 5).$$

Третій механізм (рис. 1 в) також є механізмом третього класу та має одну структурну групу третього класу четвертого порядку, тому йому відповідає формула:

$$1клас\ \ (ланки 0,1) \rightarrow 3клас\ \ 4порядок\ \ (ланки 2 \div 7).$$

Структурною особливістю наведених вище механізмів є наявність в їх структурі ланок, що приймають участь в утворенні більше двох кінематичних пар, тобто складних ланок. Так, на схемі (рис. 1, *а*) такою ланкою буде шатун 3, а на схемах (рис. 1, *б*, *в*) таких ланок спостерігається по дві на кожній схемі: кривошип 1, шатун 3 на схемі (б) та два шатуни 3, 5 -(*в*).

Кінематичний аналіз таких механізмів вимагає від дослідників застосування методів аналізу, для яких в певній послідовності складаються системи векторних кінематичних рівнянь, що застосовуються для графічних побудов, які з урахуванням третього класу механізмів необхідно буде робити декілька разів, для того щоб отримати дійсні результати розрахунків, або використовувати методи, які дозволяють визначити дійсні кінематичні параметри однієї «особливої» точки ланки механізму, а потім після проведення повторного графоаналітичного дослідження механізму отримати дійсні результати розрахунків.

Для деяких випадків складних механізмів виконати кінематичне дослідження графоаналітичним способом не є оптимально можливим. Пояснити таке можна на прикладі кінематичної схеми наведеної на рис. 1, *в*. Вихідними параметрами для кінематичного дослідження механізму є кутова швидкість кривошипу 1 (ω_1=const, $с^{-1}$) та масштаб довжин (K*l*, м/мм) кінематичної схеми механізму. Тому дослідження починається з параметрів точок кривошипу 1, за яким згідно кінематичної схеми спостерігаємо послідовне приєднання двох шатунів 2, 3, кінематичні параметри точок якого є невідомими. Подальші дослідження такого механізму графоаналітичним методом вимагають виконання такої послідовності аналізу, яка потребує виконання значної кількості графічних побудов, що в кінцевому випадку впливає на точність

отриманих результатів.

Пропонуємо звернути увагу на те, що деякі складні ланки на наведених вище кінематичних схемах мають по дві кінематичні пари, які з іншого боку утворені двома різними коромислами. Так, на рис. 1, *а* шатун 3 дві з трьох кінематичних пар утворює з коромислами 4, 5 (відповідно, кінематичні пари Е, К). Для механізму наведеному на рис. 1, *в* така ж ситуація спостерігається з шатуном 5 та коромислами 6, 7 (відповідно, кінематичні пари К, L). Для механізму наведеному на рис. 1, *б* такої ситуації з шатуном 3 не спостерігається: з одного боку складна ланка 3 утворює кінематичну пару з коромислом 5 (кінематична пара К), дві інші пари утворені з двома різними шатунами 2, 4 (відповідно, кінематичні пари D, E).

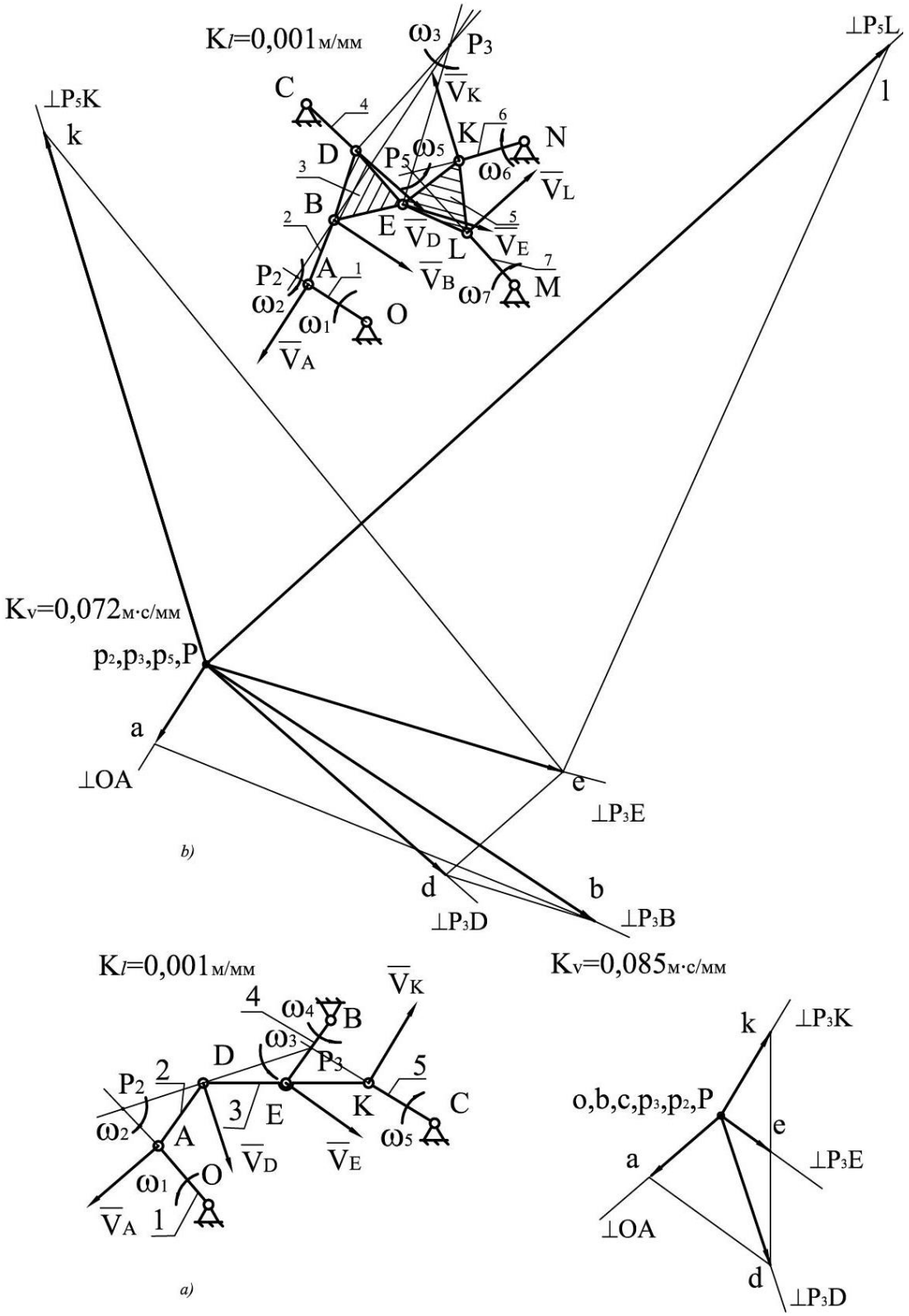


Рис. 2. Кінематичні схеми та плани швидкостей механізмів третього класу
а) **з структурною групою ланок третього порядку**
b) **з структурною групою ланок четвертого порядку**

Використовуємо положення курсу теоретична механіка, щодо дослідження плоскопаралельного руху твердого тіла та на підставі вище викладеного визначаємо положення точок миттєвих центрів обертання (М.Ц.О.) ланок 3 та 5 на кінематичних схемах наведених на рис. 2, відповідно, *а* та *b*. Так положення М.Ц.О. ланки 3 (точка P_3, рис. 2, *а*) визначаємо на перетині перпендикулярів побудованих з точок Е та К, відповідно, до напрямків їх векторів швидкостей $\vec{V}_E$ та $\vec{V}_K$, які в свою чергу знаходимо з умови їх належності до, відповідно, коромисел 4 та 5, що мають обертальний рух навколо, відповідно, центрів кінематичних пар В та С ($\vec{V}_E \perp EB$, $\vec{V}_K \perp KC$). З таких же міркувань визначаємо на кінематичній схемі (рис. 2, *b*) положення точки P_5 (точка перетину перпендикулярів побудованих з точок К та L, відповідно, до напрямків їх векторів швидкостей $\vec{V}_K$, $\vec{V}_L$, де $\vec{V}_K \perp KN$, $\vec{V}_L \perp LM$)– М.Ц.О. складної ланки 5.

Визначення положення М.Ц.О для складних ланок, що мають плоскопаралельний рух є «ключовим» моментом для подальшого розв'язання задач для складних механізмів вищого класу. Дійсно, положення точки М.Ц.О. на кінематичній схемі механізму для складної ланки дозволяє визначити напрямок векторів швидкостей будь яких інших точок цієї ж ланки. Визначаємо напрямки векторів швидкостей $\vec{V}_D$ та $\vec{V}_E$ на кінематичних схемах рис. 2, відповідно *а* та *b*, де напрямки векторів швидкостей знаходимо за знайденими положеннями відповідних М.Ц.О. складних ланок $\vec{V}_D \perp P_3D$, $\vec{V}_E \perp P_5E$.

Подальший розв'язок задач полягає в тому, щоб визначити положення точок М.Ц.О. всіх інших ланок, які в механізмах мають плоскопаралельного рух. Так на кінематичній схемі (рис. 2, *а*) визначаємо положення точки P_2 -М.Ц.О. шатуна 2 (точка перетину перпендикулярів до векторів швидкостей $\vec{V}_D$ та $\vec{V}_A$ побудованих, відповідно, з точок D та А). На схемі (рис. 2, *b*) перше ніж визначити положення точки P_2 - М.Ц.О. шатуна 2 необхідно знайти положення точки P_3 -М.Ц.О. шатуна 3, для чого з точок Е та D будуємо перпендикуляри до напрямків векторів швидкостей $\vec{V}_E$ та $\vec{V}_D$. Напрямок вектора швидкості $\vec{V}_D$ обумовлений рухом коромисла 4 навколо центра його обертання точки С ($\vec{V}_D \perp CD$). Визначаємо напрямок швидкості точки В ($\vec{V}_B \perp P_3B$) та ,нарешті, положення М.Ц.О. шатуна 2, як точки перетину перпендикулярів до векторів $\vec{V}_B$ та $\vec{V}_A$ ($\vec{V}_A \perp OA$).

Знайдені положення точок P_2 -М.Ц.О. шатунів 2, на кінематичних схемах (рис. 2, *а, b*) дозволяють визначити їх кутові швидкості за величиною та напрямком, тому що, з одного боку, точки А належать до шатунів 2, положення точок М.Ц.О. яких знайдені, а з іншого – точки А механізмів належать до кривошипів, рух яких задається за умовою задач кінематичного аналізу. З рівняння:

$$V_A = \omega_1 \bullet l_{OA} = \omega_2 \bullet l_{P_2A},$$

знаходимо

$$\omega_2 = \omega_1 \bullet l_{OA} / l_{P_2A} = 100 \bullet 0{,}017 / 0{,}011 = 150\, c^{-1},$$

(рис. 2, *а*) та

$$\omega_2 = \omega_1 \bullet l_{OA} / l_{P_2A} = 100 \bullet 0{,}015 / 0{,}003 = 500\, c^{-1},$$

(рис. 2, *b*), де ω_1=100 c^{-1} кутова швидкість кривошипів 1,

$$l_{OA} = 0{,}017\text{м},\ l_{P_2A} = 0{,}011\text{м}$$

(рис. 2, *а*);

$$l_{OA} = 0{,}015\text{м},\ l_{P_2A} = 0{,}003\text{м}$$

(рис. 2, *b*) – відповідні довжини.

Використовуємо кінематичні схеми (рис. 2, *а, b*) для визначення кутових швидкостей інших ланок механізмів третього класу:

$$\omega_3 = V_D / l_{P_3D} = \omega_2 \bullet l_{P_2D} / l_{P_3D} = 150 \bullet 0{,}019 / 0{,}025 = 114{,}0\, c^{-1},$$

$$\omega_4 = V_E / l_{EB} = \omega_3 \bullet l_{P_3E} / l_{EB} = 114{,}0 \bullet 0{,}01 / 0{,}017 = 67{,}1\, c^{-1},$$

$$\omega_5 = V_K / l_{KC} = \omega_3 \bullet l_{P_3K} / l_{KC} = 114{,}0 \bullet 0{,}015 / 0{,}017 = 100{,}6\, c^{-1}$$ до (рис. 2, *а*);

$$\omega_3 = V_B / l_{P_3B} = \omega_2 \bullet l_{P_2B} / l_{P_3B} = 500 \bullet 0{,}015 / 0{,}046 = 163{,}0\, c^{-1},$$

$$\omega_4 = V_D / l_{CD} = \omega_3 \bullet l_{P_3D} / l_{CD} = 163{,}0 \bullet 0{,}029 / 0{,}014 = 337{,}6\, c^{-1},$$

$$\omega_5 = V_E / l_{P_5E} = \omega_3 \bullet l_{P_3E} / l_{P_5E} = 163{,}0 \bullet 0{,}037 / 0{,}007 = 861{,}6\, c^{-1},$$

$$\omega_6 = V_K / l_{KN} = \omega_5 \bullet l_{P_5K} / l_{KN} = 861{,}6 \bullet 0{,}011 / 0{,}015 = 631{,}8\, c^{-1},$$

$$\omega_7 = V_L / l_{LM} = \omega_5 \bullet l_{P_5L} / l_{LM} = 861{,}6 \bullet 0{,}018 / 0{,}016 = 969{,}3\, c^{-1}$$ до (рис. 2, *b*),

де Vi – лінійні швидкості i-х точок, м/с; l_{ij} – відповідні довжини на кінематичних схемах, м.

За знайденими величинами миттєвих кутових швидкостей ланок визначаємо абсолютні лінійні швидкості точок, що збігаються з центрами кінематичних пар механізмів за рівнянням:

$$V_i = \omega i \bullet l_{P_i \ \ I},$$

де ωi – кутові швидкості i-х ланок, с$^{-1}$; $l_{P_i \ \ I}$ – відстані від відповідного М.Ц.О. до i-ї точки, м.

Візуалізацію отриманих результатів лінійних швидкостей наводимо в вигляді планів швидкостей (рис. 2, *a, b*), які побудовані в довільно обраних масштабах (Kl, м/мм).

Висновки

Розраховані кінематичні параметри кутових швидкостей ланок плоских механізмів та лінійні швидкості їх окремих точок графоаналітичним способом зі структурними групами ланок третього класу третього та четвертого порядків та розроблені послідовності дій таких досліджень, які ураховують наявність в структурі механізмів складних ланок.

Література

1. Joldasbekov Skanderbek, Ibraev Sayat, Zhauyt Algazy, Nurmagambetova Aiman, Imanbaeva Nurbibi Modular synthesis of plane lever six-link mechanism of high class. Middle-East Journal of Scientific Research, Vol. 21, Issue 12, 2014, p. 2339–2345.

2. Kosbolov Serikbay, Zhauyt Algazy, Kosbolov Serikbol Kinematic synthesis of spatial linkages with spherical pairs. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 54, Issue 1, 2016, p. 75–85.

3. Kosbolov Serikbay, Duisebayeva Kulzada, Zhauyt Algazy, Buzauova Toty Synthesis of spatial lever mechanisms on the basis of the initial kinematic chains SSS pairs. Ponte, Vol. 72, Issue 2, 2016, p. 31–52.

4. Чашников Д.О. Кинематическое исследование плоского восьмизвенного механизма шестого класса с поступательной парой аналитическим методом / Д.О. Чашников, В.В. Гаряшин // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 158–159.

5. Чашников Д.О. Кинематическое исследование плоского восьмизвенного механизма шестого класса с поступательной парой аналитическим методом / Д.О. Чашников, В.В. Гаряшин // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 158–159.

6. Dobija Marta, Drewniak Józef, Zawiślak Stanisław, Shingissov Beibit, Zhauyt Algazy Countour graph application in kinematical analysis of crane mechanism. 24th International Conference on Theory of Machines and Mechatronic Systems, Poland, 2014, p. 31–32.

7. Koshel S. Definition of accelerations of points of a plane mechanism of the fourth class by graph-analytical method / S. Koshel, A. Koshel // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2018. – № 2. – P. 28–33.

8. Кошель С.О. Визначення прискорень точок плоского механізму четвертого класу з рухомим замкненим контуром, утвореним трьома шатунами та коромислом / С.О. Кошель, Г.В. Кошель /// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 4. – С. 6–11.

9. Дворжак В. М. Візуалізація схемотехнічного моделювання механізмів технологічних машин [Електронний ресурс] / В. М. Дворжак, Д. Л. Литвяк, І. С. Мелащенко, В. В. Мочоник // Технології та дизайн. – 2018. – № 4 (29). – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_4_9

References

1. Joldasbekov Skanderbek, Ibraev Sayat, Zhauyt Algazy, Nurmagambetova Aiman, Imanbaeva Nurbibi Modular synthesis of plane lever six-link mechanism of high class. Middle-East Journal of Scientific Research, Vol. 21, Issue 12, 2014, p. 2339–2345.

2. Kosbolov Serikbay, Zhauyt Algazy, Kosbolov Serikbol Kinematic synthesis of spatial linkages with spherical pairs. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 54, Issue 1, 2016, p. 75–85.

3. Kosbolov Serikbay, Duisebayeva Kulzada, Zhauyt Algazy, Buzauova Toty Synthesis of spatial lever mechanisms on the basis of the initial kinematic chains SSS pairs. Ponte, Vol. 72, Issue 2, 2016, p. 31–52.

4. Chashnikov D.O. Kinematicheskoe issledovanie ploskogo vosmizvennogo mehanizma shestogo klassa s postupatelnoj paroj analiticheskim metodom / D.O. Chashnikov, V.V. Garyashin // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. – 2012. – № 6. – S. 158–159.

5. Chashnikov D.O. Kinematicheskoe issledovanie ploskogo vosmizvennogo mehanizma shestogo klassa s postupatelnoj paroj analiticheskim metodom / D.O. Chashnikov, V.V. Garyashin // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. – 2012. – № 6. – S. 158–159.

6. Dobija Marta, Drewniak Józef, Zawiślak Stanisław, Shingissov Beibit, Zhauyt Algazy Countour graph application in kinematical analysis of crane mechanism. 24th International Conference on Theory of Machines and Mechatronic Systems, Poland, 2014, p. 31–32.

7. Koshel S. Definition of accelerations of points of a plane mechanism of the fourth class by graph-analytical method / S. Koshel, A. Koshel // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2018. – № 2. – P. 28–33.

8. Koshel S.O. Vyznachennia pryskoren tochok ploskoho mekhanizmu chetvertoho klasu z rukhomym zamknenym konturom, utvorenym troma shatunamy ta koromyslom / S.O. Koshel, H.V. Koshel /// Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2018. – № 4. – S. 6–11.

9. Dvorzhak V. M. Vizualizatsiia skhemotekhnichnoho modeliuvannia mekhanizmiv tekhnolohichnykh mashyn [Elektronnyi resurs] / V. M. Dvorzhak, D. L. Lytviak, I. S. Melashchenko, V. V. Mochonyk // Tekhnolohii ta dyzain. – 2018. – № 4 (29). – Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_4_9

Надійшла / Paper received : 15.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-155-160
УДК 621.01

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, А.П. ЛИПИН, С.А. РОМАШКЕВИЧ
Одесская национальная академия пищевых технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУППЫ АССУРА ЧЕТВЕРТОГО КЛАССА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ДВУМЯ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ

Робота присвячена силовому дослідженню двох інших модифікацій шарнірної групи Ассура четвертого класу, другого порядку з двома поступальними парами. Обґрунтована актуальність такої задачі в світі більш широких функціональних можливостей такої групи і відсутністю простих інженерних методів дослідження, як в учбовій, так і технічній і науковій літературі. Метод базується на кінетостатиці з застосуванням графо-аналітичного методу, що більш зручно для інженерної практики проектування і легко виконується з допомогою сучасних комп'ютерів, досягається висока точність. Складена сувора послідовність проведення окремих етапів силового дослідження з застосуванням особливих точок. Приведено спосіб, який дозволяє визначити правильність рішення, а також ступінь точності обчислення та графічних побудов.

Ключові слова: поступальна кінематична пара, силове дослідження, кінетостатика, сила, момент сили, реакції, статична рівновага, план сил.

ROBERT VACHAGANOVICH AMBARTSUMYANTS,
ANDRII PAVLOVICH LIPIN, SERGEY ALEKSANDROVICH ROMASHKEVICH
Odessa National Academy of Food Technologies

DYNAMIC FORCE RESEARCH OF ASSUR GROUP OF THE FOURTH CLASS OF THE SECOND ORDER WITH TWO SLIDER KINEMATIC PAIR

Dynamic force analysis of mechanisms is one of the determining stages of their projecting and it allows to carry out calculation for strength and rigidity of elements of the kinematic pairs, units them – selves and prepare the basis for constructing.

The aim of this work is to continue to develop methods of force research of other modifications of the second order Assur group with two progressive kinematic pairs. The work is devoted to dynamic force research of Assur group of the two modification fourth class of the second order with two slider and four turning kinematic pairs. The urgency of this task in terms of wider functional possibilities of such group and absence of simple engineering methods in educational, technical and scientific literature has been substantiated. Mass-inertial indicators of all links, their kinematic indicators are set in solving the tasks. The lines of movement of progressive kinematic pairs are not parallel to each other. In the first stage of force study of the strength of friction is not taken into account, gaps in kinematic pairs are absent. The group's links are loaded with equal forces from external forces, gravity, inertia, production forces. Also, the links are loaded with equilibrium moments from external moments, moments from the forces of inertia. The method is based on the analytical – tabular methods, and that is more comfortable for engineering practice of projecting. The strict sequence of carrying out separate stages of power research with application special dots has been composed. The force research is completed with verifying construction, which allows to make a conclusion about correctness of calculating operation and graphic plotting's.

The numerical example was carried out on a personal computer with application of graphic plotting "Compass". It has been established that application of the second sign of accuracy, when determining arms of corresponding forces in the equations of forces moment balance, allows to get the solution practically without errors.

Keywords: slider kinematic pair, dynamic force research, force moment, reaction components, static equilibrium, force plan

Для проектирования любого механизма обязательным этапом является, кроме структурного и кинематического исследования, полномасштабное силовое исследование, что позволяет осуществить необходимые расчеты на прочность, жесткость отдельных звеньев и осуществить его конструирование. В учебной, научной и технической литературе в полном объеме изложены вопросы исследования групп Ассура второго класса [1, 2 и др.], благодаря чему, механизмы, синтезированные на их базе, нашли широкое применение в технике. В научной и технической литературе меньше внимания уделено группам Ассура 3-го и 4-го классов, чем объясняется их ограниченное применение в технике.

В работе [3], предложен метод кинетостатического исследования шарнирной группы Ассура 4-го класса второго порядка с одной поступательной кинематической парой, а в работе [4] – такое же исследование модификации этой же группы, но с двумя поступательными кинематическими парами. Здесь же указано, что число возможных модификаций рассматриваемой группы $M = C_6^2 = 15$.

Целью данной работы является продолжение разработки методов силового исследования других модификаций группы Ассура четвертого класса второго порядка с двумя поступательными кинематическими парами. В виду большого количества разновидностей модификаций и учитывая ограниченный объем статьи в данной работе рассматриваются только две другие модификаций группы, представленные на рис. 1, а, б.

Силовое исследование остальных модификаций рассматриваемой группы будет представлено в последующих работах авторов.

При решении поставленных задач заданы:

-массо-инерционные показатели всех звеньев, их кинематические показатели, а именно, положения, скорости и ускорения как линейных, так и угловых;

-линии перемещения поступательных кинематических пар не параллельны между собой, что

исключает появление местной подвижности;

-на первом этапе силового исследования силы трения не учитываем, а при необходимости воспользуемся методом последовательных приближений [1], зазоры в кинематических парах отсутствуют.

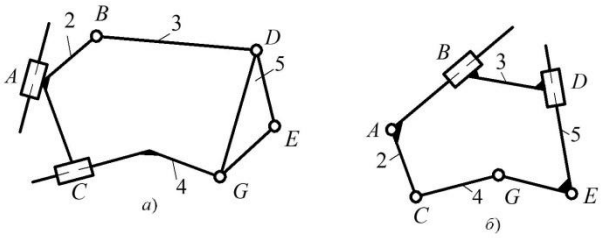


Рис. 1. Модификации группы с двумя поступательными кинематическими парами

Задача 1. Модификация группы Ассура четвертого класса с двумя поступательными кинематическими парами, образованные со звеном 2 (см. рис. 1, а).

Звенья группы нагружены равнодействующими силами $\overline{F}_i (i = 2,...,5)$ от внешних сил, сил тяжести, сил инерции, производственных сил. Также звенья нагружены равнодействующими моментами $\overline{M}_i (i = 2,...,5)$ от внешних моментов, моментов от сил инерции и др. (рис. 2).

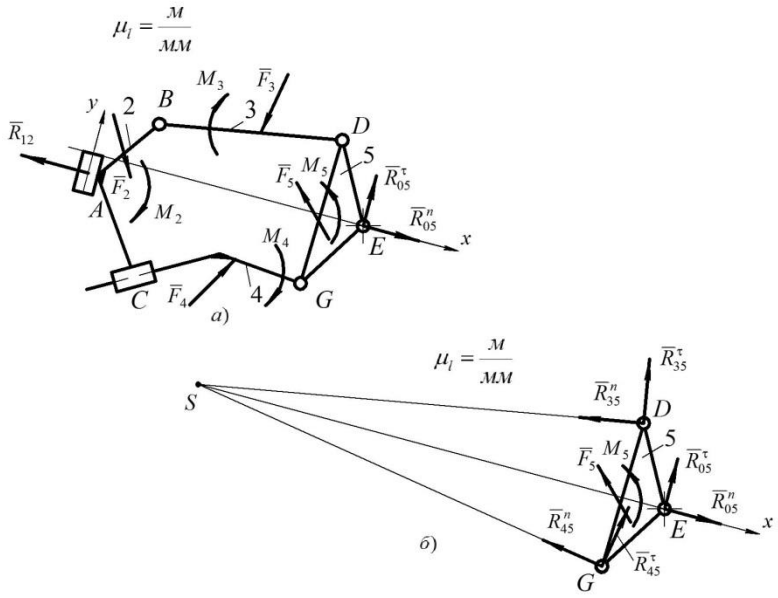


Рис. 2. Расчетные модели группы – а), звена 5 – б)

Через центр шарнира E проводим ось x, перпендикулярную линии перемещения поступательной кинематической пары A, а ось y совместим с линией перемещения этой пары A. Неизвестную реакцию $\overline{R}_{05}$ в шарнире E разложим на составляющие – по оси x $\overline{R}^{n}_{05}$ и по оси y – $\overline{R}^{\tau}_{05}$. Реакция $\overline{R}_{12}$ в поступательной кинематической паре A – перпендикулярно к оси y. Здесь неизвестным являются также точка приложения реакций $\overline{R}_{12}$.

Для определения значения названных неизвестных, а также полные реакции в шарнирных соединениях B, D, E, G предлагаем следующую последовательность решения.

1. Рассматриваем статическое равновесие группы (рис.2, а) и составляем уравнение равновесия проекций сил по оси y $\sum^{zp} Y = 0$. Из этого уравнения находим составляющую $\overline{R}^{\tau}_{05}$ реакции в шарнире E.

2. Разрываем связи в шарнирных соединениях D, G и представим расчетную модель силового исследования звена 5 (рис. 2, б). В шарнире, D, реакцию $\overline{R}_{35}$ разлагаем на составляющие – перпендикулярно и продольно оси звена 3 $\overline{R}_{35} = \overline{R}^{\tau}_{35} + \overline{R}^{n}_{35}$. В пересечении линий действия сил $\overline{R}^{n}_{05}$ и $\overline{R}^{n}_{35}$ находим особую точку S. В шарнире, G реакцию $\overline{R}_{45}$ разлагаем на составляющие – по линии GS и перпендикулярно $\overline{R}_{45} = \overline{R}^{\tau}_{45} + \overline{R}^{n}_{45}$.

3. Рассматриваем статическое равновесие звена 3 и составляем уравнение равновесия моментов сил

относительно центра шарнира B $\sum^{3} M_B(F) = 0$. Из этого уравнения находим составляющую $\overline{R}_{53}^{\tau} = -\overline{R}_{35}^{\tau}$.

4. Составляем уравнение равновесия моментов сил звена 5 относительно точки S $\sum^{5} M_S(F) = 0$. Из этого уравнения находим реакцию $\overline{R}_{45}^{\tau}$.

5. Рассматриваем статическое равновесие звена 4 (рис. 3, а). Загружаем его реакциями связей $\overline{R}_{54} = \overline{R}_{54}^{\tau} + \overline{R}_{54}^{n}$, $\overline{R}_{42}$ в поступательной кинематической паре C, а также равнодействующими $\overline{F}_4$ и M_4 от всех внешних сил и моментов. Составляем векторное уравнение равновесия сил звена 4

$$\sum \overline{F}^{4} = \overline{R}_{24} + \overline{R}_{54}^{\tau} + \overline{R}_{54}^{n} + \overline{F}_4 = 0. \quad (1)$$

На основании векторного уравнения (1) строим план сил (рис. 3, б) откуда находим неизвестные векторы $\overline{R}_{24}$ и $\overline{R}_{54}^{n}$.

Для определения точки приложения реакции $\overline{R}_{24}$ составляем уравнение равновесия моментов звена относительно центра шарнира G $\sum^{4} M_G(F) = 0$. Из решения этого уравнения находим расстояние h_{24} (см рис. 3, а).

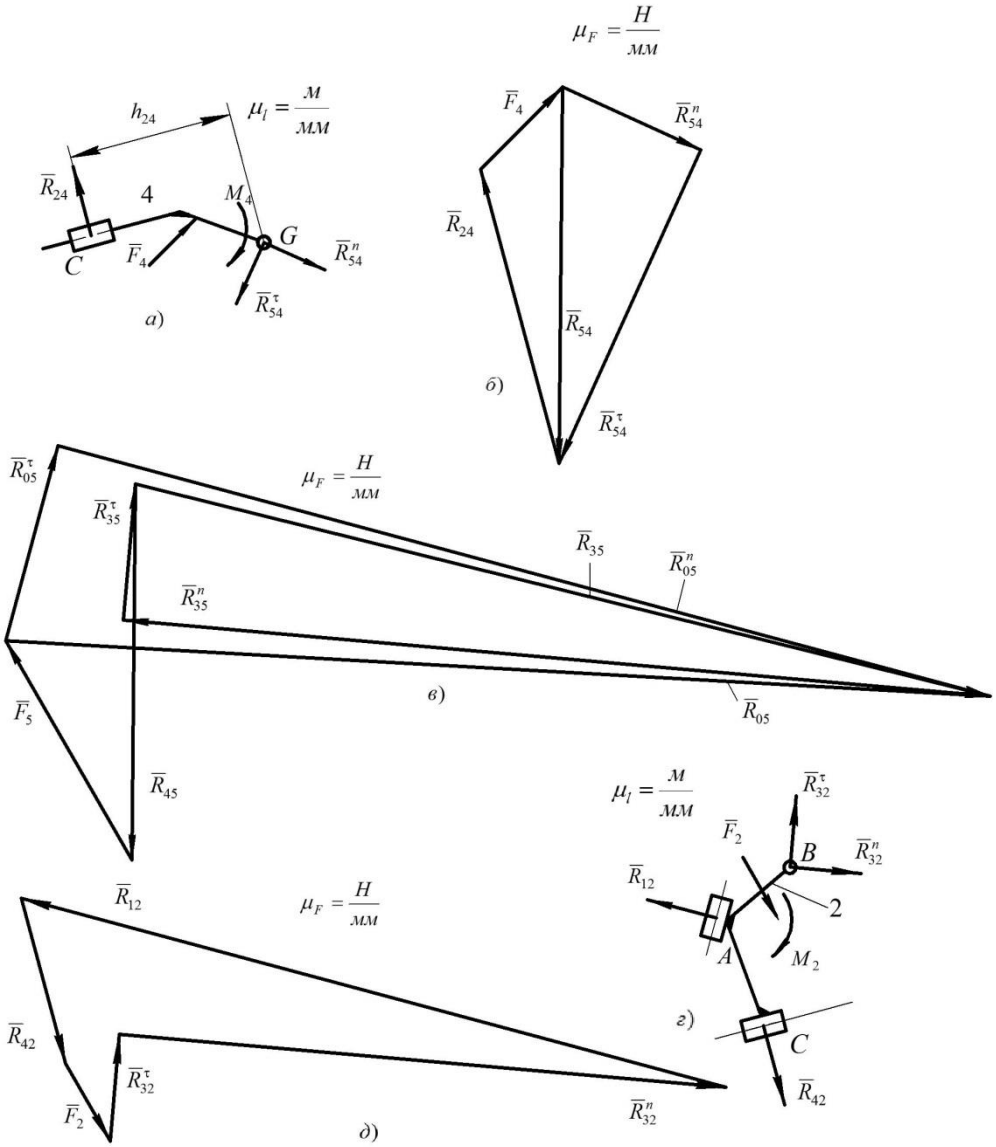


Рис. 3. Расчетные модели: звена 4 – а), звена 2 – г), планы сил звена 4 – б), звена 5 – в), звена 2 – д)

6. Составляем векторное уравнение равновесия сил звена 5

$$\sum \bar{F}^5 = \bar{R}_{35}^n + \bar{R}_{35}^\tau + \bar{R}_{45}^\tau + \bar{F}_{45}^n + \bar{F}_5 = 0. \quad (2)$$

На основании уравнения (2) строим план сил звена 4 (рис. 3, б) откуда находим неизвестные реакции $\bar{R}_{35}^n$ и $\bar{R}_{05}^n$.

7. Рассматриваем статическое равновесие звена 2 (рис. 3, г). Загружаем его реакциями связей $\bar{R}_{32} = \bar{R}_{32}^\tau + \bar{R}_{32}^n$, направив $\bar{R}_{32}^\tau$ по оси звена 3 и перпендикулярно к ней составляющую $\bar{R}_{32}^n$, в поступательной кинематической паре C реакциями $\bar{R}_{12}$ и $\bar{R}_{42}$, а также равнодействующими $\bar{F}_2$ и M_2 от всех внешних сил и моментов соответственно. Модуль и направление составляющей $\bar{R}_{32}^\tau$ находим, рассматривая равновесие звена 3 и составляя уравнение равновесия моментов сил относительно центра шарнира D. Далее, составляем векторное уравнение равновесия сил звена 2

$$\sum \bar{F}^2 = \bar{R}_{32}^n + \bar{R}_{32}^\tau + \bar{R}_{42} + \bar{R}_{12} + \bar{F}_2 = 0. \quad (3)$$

На основании уравнения (3) строим план сил звена 2 (рис. 3, д) откуда находим неизвестные реакции $\bar{R}_{35}^n$ и $\bar{R}_{05}^n$. Для определения точки приложения реакции $\bar{R}_{12}$ составляем уравнение равновесия моментов звена относительно центра шарнира B $\sum^2 M_B(F) = 0$. Из решения этого уравнения находим точку приложения этой реакции.

Для проверки всех расчетных операций и графических построений можно использовать условие статического равновесия сил звена 3, а именно – векторная сумма всех сил должна равняться нулю, поскольку это условие нами не было использовано при силовом исследовании группы.

Задача 2. Модификация группы Ассура четвертого класса с двумя поступательными кинематическими парами, образованные со звеном 2 (см. рис. 1, а).

Звенья группы нагружены равнодействующими силами $\bar{F}_i (i = 2,...,5)$ от внешних сил, сил тяжести, сил инерции, производственных сил. Также звенья нагружены равнодействующими моментами $\bar{M}_i (i = 2,...,5)$ от внешних моментов, моментов от сил инерции и др. (рис. 4, а). Линии перемещения поступательных кинематических пар в соединениях B и D не параллельны.

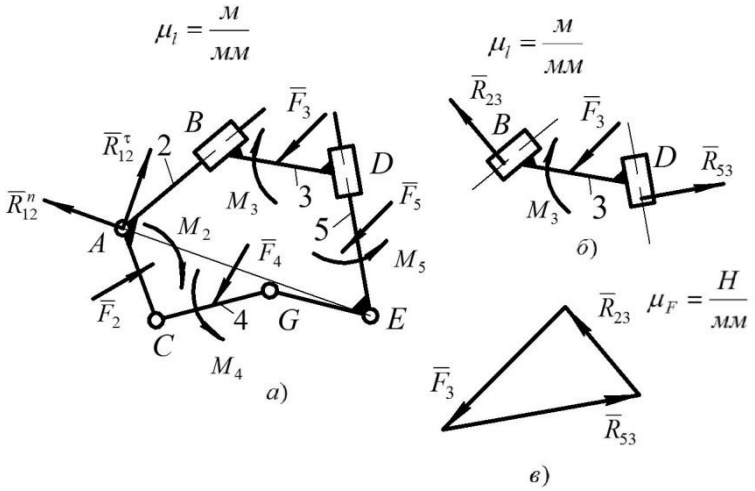


Рис. 4. Расчетные модели группы – а), звена 3 – б), план сил звена 3

Для определения значения реакций в кинематических парах предлагаем следующую последовательность решения.

1. Реакцию в шарнире A разлагаем на составляющие $\bar{R}_{12} = \bar{R}_{12}^\tau + \bar{R}_{12}^n$, нормальную составляющую $\bar{R}_{12}^n$ направляем по прямой AE, а тангенциальную $\bar{R}_{12}^\tau$ – перпендикулярно к прямой AE.

2. Рассматриваем статическое равновесие звена 3 (см. рис. 4, б). Поскольку силы трения на первом этапе исследования не учтены, то реакции $\bar{R}_{23}$ и $\bar{R}_{53}$ направлены перпендикулярно к соответствующим направляющим. Составляем векторное уравнение равновесия сил звена 3

$$\sum \overline{F}^3 = \overline{R}_{23} + \overline{R}_{53} + \overline{F}_3 = 0 . \quad (4)$$

На основании уравнения (4) строим план сил (рис. 4, в) и находим реакции $\overline{R}_{23}$ и $\overline{R}_{53}$.

3. Рассматриваем статическое равновесие звена 2 (рис. 5, а). Реакцию в шарнире C разлагаем на составляющие $\overline{R}_{42} = \overline{R}^{\tau}_{42} + \overline{R}^{n}_{42}$, нормальную составляющую $\overline{R}^{n}_{42}$ направляем по продольной оси CG, а тангенциальную $\overline{R}^{\tau}_{42}$ – перпендикулярно к этой же оси. Тангенциальную составляющую $\overline{R}^{\tau}_{42} = -\overline{R}^{\tau}_{24}$ находим, рассматривая равновесие звена 4 и составляя уравнение равновесия моментов относительно центра шарнира G $\sum^{4} M_G(F) = 0$. Составляем векторное уравнения равновесия сил звена 2.

$$\sum \overline{F}^2 = \overline{R}^{n}_{12} + \overline{R}^{\tau}_{12} + \overline{R}^{\tau}_{42} + \overline{R}^{n}_{42} + \overline{F}_2 = 0 . \quad (5)$$

На основании уравнения (5) строим план сил (рис. 5, в) и находим реакции $\overline{R}^{n}_{12}$ и $\overline{R}^{n}_{42}$.

4. Составляем уравнение равновесия моментов сил звена 2 относительно центра шарнира A (рис. 5, а) $\sum^{2} M_A(F) = 0$. Из решения этого уравнения находим расстояние h_{32}.

5. Составляем векторное уравнение равновесия сил звена 4, строим его план сил и находим полную реакцию $\overline{R}_{54}$ в шарнире G.

6. Рассматриваем статическое равновесие звена 5 (рис. 5, б). Загружаем его внешними силами и моментами, а также известными реакциями $\overline{R}_{35} = -\overline{R}_{53}$ и $\overline{R}_{45} = -\overline{R}_{54}$. На звене неизвестным остается только реакция в шарнире E. Составляем векторное уравнения равновесия сил звена 5.

$$\sum \overline{F}^5 = \overline{R}_{35} + \overline{R}_{45} + \overline{F}_5 = 0 . \quad (6)$$

На основании уравнения (6) строим план сил (рис. 5, г) и находим полную реакцию $\overline{R}^{n}_{05}$. Для определения точки приложения реакции $\overline{R}_{35} = -\overline{R}_{53}$ составляем уравнение равновесия моментов сил звена 5 относительно центра шарнира E $\sum^{5} M_E(F) = 0$. Решая, это уравнение находим расстояние h_{35} (рис. 5, б).

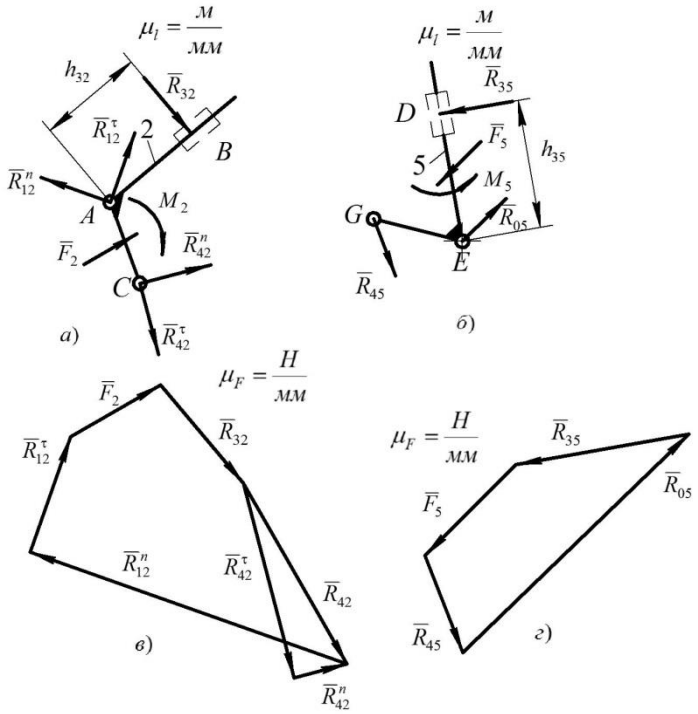


Рис. 5. Расчетные модели звеньев 2, 5 –а), б) и их планы сил – в), г) соответственно

Для проверки всех расчетных операций и графических построения можно использовать условие статического равновесия сил звена 3, а именно – векторная сумма моментов всех сил относительно любой произвольной точки звена, (например, точки приложения любой силы) должна равняться нулю, поскольку это условие нами не было использовано при силовом исследовании группы.

Еще раз напоминаем: учет сил трения, что особенно важно при наличии поступательных кинематических пар, можно осуществить методом последовательных приближений используя предложенный метод и добавляя внешним силам силы трения в кинематических парах, значения которых определяют согласно закону Кулона, принимая во внимание значения реакций, определенные на первом этапе.

Заключение. Надеемся, что представленные решения задачи по кинетостатике модификации группы 4-го класса заинтересуют инженеров конструкторов, для широкого применения таких групп в современных технологических машинах. Также более широкого применения в перспективных шагающих машинах, необходимых как для сельского хозяйства, так и для непроходимых для человека местностей.

Литература

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И.И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и допол. − М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1988. – 640 с.

2. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. – М. : Наука, 1990. – 592 с.

3. Амбарцумянц Р. В. Кинетостатическое исследование шарнирной группы Ассура четвертого класса второго порядка с одной поступательной парой / Р.В. Амбарцумянц, А.П. Липин, С.А. Ромашкевич // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 5. – С. 24–29.

4. Амбарцумянц Р. В. Кинетостатика группы Ассура четвертого класса второго порядка с двумя поступательными парами / Р.В. Амбарцумянц, С.А. Ромашкевич // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 1.

References

1. Artobolevskij I.I. Teoriya mehanizmov i mashin : ucheb. dlya vuzov / I.I. Artobolevskij. – 4-e izd., pererab. i dopol. − M. : Nauka. Gl. red. fiz.-mat. literatury, 1988. – 640 s.

2. Levitskij N. I. Teoriya mehanizmov i mashin / N. I. Levitskij. – M. : Nauka, 1990. – 592 s.

3. Ambarcumyanc R. V. Kinetostaticheskoe issledovanie sharnirnoj gruppy Assura chetvertogo klassa vtorogo poryadka s odnoj postupatelnoj paroj / R.V. Ambarcumyanc, A.P. Lipin, S.A. Romashkevich // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 5. – S. 24–29.

4. Ambarcumyanc R. V. Kinetostatika gruppy Assura chetvertogo klassa vtorogo poryadka s dvumya postupatelnymi parami / R.V. Ambarcumyanc, S.A. Romashkevich // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2020. – № 1.

Надійшла / Paper received : 09.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-161-172
УДК 624.131.3

О.А. ДОРОФЄЄВ, О.В. БАГРІЙ, В.В. КОВТУН
Хмельницький національний університет

ПЛОСКА КРАЙОВА ЗАДАЧА ДИСКРЕТНОГО СЕРЕДОВИЩА

Розглядаються статичні, геометричні та фізичні співвідношення, а також крайові умови, що формують крайову задачу плоскої розрахункової області, заповненої фізично дискретним матеріалом, який працює в умовах плоско-деформованого напруженого стану. Наводиться математичне та скінчено-елементне формулювання задачі. Описуються ітераційні процедури розв'язання плоскої крайової задачі механіки дискретного середовища методом скінчених елементів.

Ключові слова: плоска крайова задача; дискретне середовище; внутрішнє кулонове тертя; дилатансія.

O.A. DOROFEYEV, O.V. BAHRII, V.V. KOVTUN
Khmelnytskyi National University

FLAT BOUNDARY VALUE PROBLEM OF A DISCRETE MEDIUM

The article deals with the defining relations of the plane boundary value problem of a discrete medium and specific methods of its solution. A boundary value problem is considered to assess the state of a discrete medium. Its physical ratios should reflect the fundamental features of the deformation of the discrete medium: the influence of internal Coulomb friction on the deformation process at all stages of loading; occurrence of volume deformations during shear (dilatancy); significant influence of the type of stress-strain state on the nature of the laws of discrete materials deformation. The problem is formulated as a boundary value problem of a flat physically nonlinear inhomogeneous area filled with a discrete material that does not perceive tensile stresses and counteracts external perturbations only due to internal dry pendant friction. The material is considered to be quasi-continuous, which is deformed under conditions of plane deformation according to the experimentally established nonlinear laws of Coulomb's rheological model. The hypothesis of small deformations is introduced, which allows using linear differential Cauchy dependences to fulfil the condition of deformation continuity. It is assumed that the stress-strain state of the calculation area is estimated only by the stresses and strains that occur in the plane of deformation perpendicular to the axis with zero deformation. Mathematical and finite-element formulation of the problem is given. Iterative procedures for solving a plane boundary value problem of the mechanics of a discrete medium by the finite element method are described.

Keywords: flat boundary value problem, discrete environment, internal Coulomb's friction, dilatation.

Вступ. Інженерна механіка розглядає контактну взаємодію матеріалів різних класів: твердих тіл; рідин; газів; фізично-дискретних матеріалів. При силовому чи кінематичному навантаженні матеріали деформуються, – змінюють свій напружено-деформований стан, що теоретично можна описати шляхом формулювання і розв'язання відповідної крайової задачі. Для описання напружено-деформованого стану твердих тіл використовуються добре апробовані теорії пружності, пластичності, повзучості; для рідин – апарат гідромеханіки; для газів – аеродинаміки. Розрахункової ж моделі більш складних реологічних об'єктів – дискретних матеріалів – ще недостатньо розроблені.

Аналіз реологічних моделей, які пропонувалися для описання напружено-деформованого стану дискретного середовища, показав [1], що найбільш перспективним є використання моделей нелінійної механіки ґрунтів, які розглядають дискретне середовище як квазісуцільне, що деформується за специфічними нелінійними законами. Характер цих законів встановлюється експериментально за результатами спеціальних лабораторних випробувань макрозразків конкретного матеріалу.

Встановлені експериментально закони деформування використовуються для формулювання нелінійних фізичних рівнянь плоскої крайової задачі механіки дискретних матеріалів.

Метою статті є обґрунтування визначальних співвідношень плоскої крайової задачі дискретного середовища і специфічних методів її розв'язання.

Стан проблеми. Визначальні співвідношення крайової задачі будь-якого середовища повинні відображати особливості деформування матеріалу, що його заповнює. Результати лабораторних випробувань дискретних матеріалів, переважно сухих пісків, дозволили встановити принципові відмінності законів їх деформування від твердих тіл [2].

На відміну від твердих тіл деформування дискретного середовища відбувається переважно за рахунок взаємних зсувів твердих частинок матеріалу по хаотично орієнтованих мікроконтактах. Цим зсувам протидіють сили внутрішнього кулонового тертя, вплив якого не відображають співвідношення класичних теорій пружності і пластичності.

Для оцінки стану дискретного середовища при силовому чи кінематичному збуренні розглядається відповідна крайова задача, фізичні співвідношення якої повинні відображати такі принципові особливості його деформування:

1. Вплив внутрішнього кулонового тертя на процес деформування на усіх етапах навантаження. Цю особливість можна врахувати, якщо закон формозміни дискретного середовища представити у вигляді залежності девіатора деформацій $\{D_\varepsilon\}$ не тільки від девіатора напружень $\{D_\sigma\}$, але й від кульового тензора деформацій $\{\sigma_0\}$, тобто як залежність між другим інваріантом тензора деформацій I_2^ε та інваріантами I_1^σ, I_2^σ тензора напружень

$$I_2^{\varepsilon} = \varphi\left(I_1^{\sigma}, I_2^{\sigma}\right). \quad (1)$$

2. Виникнення об'ємних деформацій при зсувах (дилатансія). Прояв дилатансії з позицій механіки твердого деформівного тіла можна представити як залежність між першим інваріантом тензора деформацій I_1^{ε} і інваріантами I_1^{σ}, I_2^{σ} тензора напружень

$$I_1^{\varepsilon} = \psi\left(I_1^{\sigma}, I_2^{\sigma}\right). \quad (2)$$

3. Суттєвий вплив на характер законів деформування дискретних матеріалів виду напружено-деформованого стану. На відміну від твердих тіл дискретні матеріали завжди працюють в умовах складного (тривісного) напруженого стану. Деформований же стан матеріалу може бути: *простим*, *одновісним* (стискання в обоймі); *плоским*, *двовісним*, коли деформації поздовж одного напряму обмежені (протяжні споруди); *складним*, *тривісним*. Залежністю законів деформування від виду напружено-деформованого стану можна знехтувати, якщо характер цих законів встановлюється в умовах того ж напружено-деформованого стану, в якому працює матеріал в натурі. Наприклад, при формулюванні фізичних співвідношень плоскої крайової задачі дискретного середовища можна використати інваріантні залежності (1) і (2). Але вони повинні бути одержані за результатами випробувань зразків матеріалу на приладах, у яких відтворюється плоско-деформований напружений стан, характерний для більшості протяжних інженерних конструкцій.

Основний матеріал і результати.

Основні співвідношення плоскої крайової задачі дискретного середовища

Задача формулюється як крайова задача плоскої фізично-нелінійної неоднорідної області, заповненої дискретним матеріалом, який не сприймає розтягуючих напружень і протидіє зовнішнім збуренням тільки за рахунок внутрішнього сухого кулонового тертя.

Матеріал розглядається як квазісуцільний, що деформується в умовах плоскої деформації за встановленими експериментально нелінійними законами реологічної моделі Кулона. Вводиться гіпотеза малості деформацій, що дозволяє використовувати лінійні диференціальні залежності Коші для виконання умови нерозривності деформацій.

Вважається, що напружено-деформований стан розрахункової області оцінюється тільки напруженнями $\sigma(x, y)$ і деформаціями $\varepsilon(x, y)$, що виникають у площині деформування *xy*, перпендикулярній осі *z* з нульовою деформацією $(\varepsilon_z = 0)$.

У випадку плоскої деформації умова рівноваги записується двома диференціальними рівняннями

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \mathrm{v}_x \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \mathrm{v}_y \end{aligned}\right\},$$

де v_x, v_y – об'ємні сили;

σ_x, σ_y, τ_{xy} – напруження в площині деформування.

Для подальшого використання систему рівнянь рівноваги зручно записати в матричній формі

$$[C]\{\sigma\} = \{\mathrm{v}\}, \quad (3)$$

де $[C]$ – матриця диференціального оператора

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix};$$

$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$ – вектор напружень;

$\{\mathrm{v}\} = \begin{Bmatrix} \mathrm{v}_x \\ \mathrm{v}_y \end{Bmatrix}$ – вектор об'ємних сил.

Умову нерозривності деформацій безпосередньо одержують з лінійних диференціальних залежностей Коші

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \tau_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial y},$$

які описуються одним матричним рівнянням

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}, \quad (4)$$

в якому

$\{\varepsilon\}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix}$, $\{u\}=\begin{Bmatrix}u_x\\ u_y\end{Bmatrix}$ – вектори деформацій і переміщень в площині деформування *xy*;

$[B]$ – матриця диференціального оператора

$$[B]=\begin{bmatrix}\frac{\partial}{\partial x} & 0\\ 0 & \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x}\end{bmatrix}.$$

Характер рівнянь рівноваги та нерозривності деформацій не залежить від особливостей деформування матеріалу.

Необхідні ж для формулювання крайової задачі фізичні співвідношення «напруження–деформації» встановлюються за результатами лабораторних випробувань макрозразків матеріалу в умовах, коли їх напружено-деформований стан збігається з особливостями задачі. У випадку плоскої крайової задачі механіки дискретного середовища використовуються співвідношення «напруження–деформації», що встановлені за результатами випробувань макрозразків матеріалу на оригінальних приладах плоскої деформації [4, 5]. Ці співвідношення записуються у формі інваріантних залежностей нелінійної теорії пружності зі змінними модулем зсуву $G_{зм}$ і модулем об'ємної деформації $K_{зм}$

$$S = G_{зм}\Gamma, \tag{5}$$

$$\sigma_m = K_{зм}\varepsilon_m, \tag{6}$$

в яких інваріанти тензорів напружень та деформацій мають чіткий фізичний зміст:

$S=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}$ – другий інваріант тензора напружень; у випадку плоскої задачі – максимальне дотичне напруження;

$\sigma_m=\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}$ – середнє стискуюче напруження;

$\Gamma=\varepsilon_1-\varepsilon_2$ – другий інваріант тензора деформацій за умови $\varepsilon_z=0$;

$\varepsilon_m=\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2}$ – деформація об'єму;

σ_1, σ_2, ε_1, ε_2 – головні стискаючі напруження і деформації у площині деформування (за додатні приймаються стискуючі напруження).

Функціональна залежність (5) описує закон формозміни дискретного матеріалу в умовах плоского деформування, а залежність (6) – закон зміни об'єму. В механіці твердого деформівного тіла закони формозміни і зміни об'єму вважаються незалежними. У механіці ж дискретних матеріалів ці закони є взаємопов'язаними, а співвідношення (5) і (6) описують єдину поверхню деформування у багатовимірному просторі інваріантів

$\Phi(S,\sigma_m,\Gamma,\varepsilon_m)=0$.

Характер цієї поверхні можна геометрично представити її зрізами

$$S=\varphi(\Gamma)\text{, при } \sigma_m=const \text{ і} \tag{7}$$

$$\varepsilon_m=\psi(\sigma_m)\text{, при } S=const\,. \tag{8}$$

Вирази (7) і (8) будуть аналогічними інваріантним залежностям (5) та (6) нелінійної теорії пружності за умови, що деформаційні параметри $G_{зм}$, $K_{зм}$ визначаються за результатами випробувань зразків дискретного матеріалу відповідно при $\sigma_m=const$ і $S=const$. Лабораторні випробування сухого кварцового піску на приладі плоскої деформації [6] при $\sigma_m=const$ дозволяють апроксимувати експериментальну залежність (5) дробово-лінійною функцією

$$S=\frac{n\Gamma}{m+\Gamma}\sigma_m, \tag{9}$$

де *n*, *m* – параметри апроксимації. З виразу (9) безпосередньо визначається величина змінного січного модуля зсуву

$$G_{зм}=\frac{n}{m+\Gamma}\sigma_m. \tag{10}$$

Отже, величина модуля зсуву $G_{зм}$ дискретного матеріалу залежить не тільки від деформацій зсуву Γ, як це прийнято в механіці твердого деформівного тіла, але й від стискаючого напруження σ_m. Ця

відмінність інтерпретується як вплив внутрішнього кулонового тертя на деформування дискретного матеріалу.

Для формулювання фізичних рівнянь крайової задачі у формі нелінійної теорії пружності необхідно крім змінного модуля зсуву $G_{зм}$ експериментальним шляхом встановити величину другого параметра $K_{зм}$, який входить у залежність (6), котра описує закон зміни об'єму дискретного середовища. Ця задача суттєво ускладнюється в зв'язку з принциповою відмінністю закону зміни об'єму дискретного матеріалу і твердого тіла. Ще в 1886 р. О. Рейнольдс [3] встановив, що на зміни об'єму дискретного матеріалу впливають не тільки нормальні напруження, але й дотичні (прояв дилатансії). Тобто, закон зміни об'єму описується більш складною інваріантною функцією

$$\varepsilon_m = \psi(\sigma_m, S). \tag{11}$$

У вираз (6) входить змінний модуль деформації $K_{зм}$, який можна представити як суму двох доданків

$$K_{зм} = K_{зм}^{\sigma_m} + K_{зм}^{\partial}. \tag{12}$$

Перший доданок $K_{зм}^{\sigma_m}$ відображає залежність об'ємних деформацій від стискаючого напруження σ_m. Його величину можна визначити за результатами випробувань зразків матеріалу на оригінальному компресійному приладі [7], [8]. Величина другої, дилатансійної складової $K_{зм}^{\partial}$ знаходиться з відомого співвідношення механіки твердого деформівного тіла

$$K_{зм}^{\partial} = 2G_{зм}\frac{1+\nu_{зм}}{1-\nu_{зм}}, \tag{13}$$

у яке входять визначені експериментально змінний модуль зсуву $G_{зм}$ і коефіцієнт Пуассона $\nu_{зм}$. Величину $\nu_{зм}$ легко визначити з випробувань на приладі плоскої деформації ([4, 5]), в яких фіксуються головні напруження σ_1, σ_2 в площині деформування і напруження σ_z у перпендикулярному напрямку.

З умови плоского деформування $(\varepsilon_z = 0)$ знаходимо

$$\nu_{зм} = \frac{\sigma_z}{\sigma_1 + \sigma_2}. \tag{14}$$

Випробування сухого піску на приладі плоскої деформації показали, що коефіцієнт Пуассона $\nu_{зм}$ є найбільш стабільним безрозмірним деформаційним параметром, який зручно використовувати для аналізу напружено-деформованого стану дискретного середовища.

Фізичні рівняння плоскої задачі можна записати через знайдені експериментально деформаційні параметри $G_{зм}$ і $K_{зм}$ у координатній формі

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{K_{зм}+2G_{зм}}{2}\varepsilon_x + \frac{K_{зм}-2G_{зм}}{2}\varepsilon_y;\\
\sigma_y &= \frac{K_{зм}-2G_{зм}}{2}\varepsilon_x + \frac{K_{зм}+2G_{зм}}{2}\varepsilon_y;\\
\tau_{xy} &= G_{зм}\gamma_{xy}.
\end{aligned}\right\}, \tag{15}$$

або одним матричним рівнянням

$$\{\sigma\} = [D_{зм}]\{\varepsilon\}, \tag{16}$$

де $[D_{зм}]$ – матриця змінних деформаційних параметрів

$$[D_{зм}] = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} K_{зм}+2G_{зм} & K_{зм}-2G_{зм} & 0 \\ K_{зм}-2G_{зм} & K_{зм}+2G_{зм} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{зм} \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Математичне формулювання плоскої крайової задачі механіки дискретних матеріалів

Розглядається вирізана з масиву дискретного середовища, що працює в умовах плоского деформування, розрахункова область *0* одиничної товщини *h=1* (рис. 1).

На дільниці $S(R)$ контуру задаються зовнішні силові навантаження $R(x,y)$ (силові крайові умови); на дільниці $S(u)$ – відомі переміщення $u(x,y)$ (кінематичні крайові умови). На $S(0)$ переміщення відсутні, $u = 0$.

Задача полягає у визначенні напружень $\sigma(x,y)$, деформацій $\varepsilon(x,y)$ і переміщень $u(x,y)$, які відповідають прийнятій реологічній моделі середовища та заданим крайовим умовам на межі області.

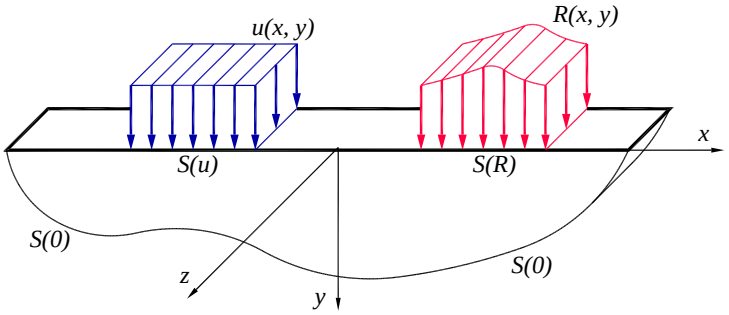


Рис. 1. Плоска розрахункова область

Для формулювання задачі використовуються три системи рівнянь, які зручно записати у матричній формі:

статичні рівняння рівноваги (3) –

$$[C]\{\sigma\}=\{\mathrm{v}\};$$

геометричні рівняння Коші (4) –

$$[B]\{u\}=\{\varepsilon\};$$

фізичні рівняння (16) –

$$[D]_{зм}\{\varepsilon\}=\{\sigma\}.$$

Для конкретизації задачі задаються силові та кінематичні крайові умови на межі області

$$\left.\begin{array}{l}[L]\{\sigma\}=\{R_S\} \quad на\ S(R);\\ \{u\}=\{u_S\} \quad на\ S(u);\\ \{u\}=\{0\} \quad на\ S(0).\end{array}\right\},$$

де $\{R_S\}$ – вектор відомих сил на межі $S(R)$;

$[L]$ – матриця напрямних косинусів

$$[L]=\begin{bmatrix} m & 0 & l \\ 0 & l & m \end{bmatrix};$$

$\{u_S\}$ – відомі переміщення на межі $S(u)$;

$\{0\}$ – відсутність переміщень на межі $S(0)$.

Враховуючи те, що у нелінійні фізичні рівняння входять змінні модулі деформації $G_{зм}$ та $K_{зм}$, величина яких залежить від досягнутого рівня напружено-деформованого стану у кожній точці розрахункової області, сформульовану задачу можна класифікувати як фізично нелінійну крайову задачу *неоднорідної* плоскої області.

Очевидно, що для розв'язання такої складної задачі необхідно розробити спеціальні ітераційні процедури, які можна реалізувати тільки з використанням потужних комп'ютерних систем і результатів лабораторних випробувань макрозразків конкретного матеріалу на двовісне стискання в умовах плоскої деформації.

Запропоновано багато чисельних методів, які з використанням спеціальних ітераційних процедур дозволяють одержати рішення фізично-нелінійних задач механіки твердого деформівного тіла. Найбільш ефективним з них вважається метод скінчених елементів (МСК), який може бути базовим методом для розробки ітераційних алгоритмів розв'язання плоскої граничної задачі механіки дискретного середовища з урахуванням специфіки його деформування.

Скінчено-елементне формулювання задачі

Ідея методу скінчених елементів полягає у заміні суцільної розрахункової області системою скінчених елементів, які взаємодіють між собою тільки у вузлах. В цих точках, за визначенням, забезпечується виконання умови нерозривності деформування або умови рівноваги. Зусилля і переміщення у вузлах знаходяться методами будівельної механіки, найчастіше методом переміщень. Кожний скінчений елемент деформується згідно з фізичними співвідношеннями прийнятої реологічної моделі. Це дозволяє знайти напруження і деформації всередині елемента, що відповідають вузловим зусиллям та переміщенням, і звести розв'язок крайової задачі суцільної розрахункової області до більш простої задачі взаємодії системи скінчених елементів заданої форми, яка розв'язується відомими методами будівельної механіки.

Зручність використання МСЕ для розв'язання нелінійних задач пояснюється простотою та чіткістю інтерпретації усіх етапів розрахунку, можливістю здійснювати поетапний контроль результатів. Але найбільш важливою особливістю методу є те, що для спеціально вибраних форми елемента і апроксимуючих функцій напруження та деформації не будуть змінюватися в межах одного елемента. Оскільки модулі деформацій дискретних матеріалів залежать від досягнутого рівня напруженого стану, значення модулів деформацій на конкретному етапі розрахунку в цьому випадку можна призначати не для кожної точки розрахункової області, а для кожного скінченого елемента. Це дає можливість реалізувати

спеціальні ітераційні алгоритми розрахунків чисельними методами.

Послідовність розв'язання крайової задачі методом скінчених елементів зводиться до використання наступних операцій:

створюють дискретну модель розрахункової області – розбивають суцільну область на сітку скінчених елементів (рис. 2);

зовнішні навантаження на межі області $S(R)$, а також об'ємні сили приводять до вузлових сил $\{R\}$, а відомі переміщення на межі $S(u)$ – до вузлових переміщень $\{\delta\}$. Умову неможливості переміщень на межі $S(0)$ задовольняють шляхом введення у вузлах на межі області відповідних в'язів;

для кожного скінченого елемента формулюють матрицю жорсткості $[k_e]$, яка зв'язує між собою вектори вузлових сил з векторами переміщень вузлів, що належать одному і тому ж елементу;

формулюють глобальну матрицю жорсткості $[K]$ системи елементів, яка враховує „внесок" кожного скінченого елемента у жорсткість всієї системи;

формулюють і розв'язують систему канонічних рівнянь будівельної механіки, найчастіше методу переміщень, в результаті чого знаходять вузлові переміщення, а через них – деформації і напруження в скінчених елементах.

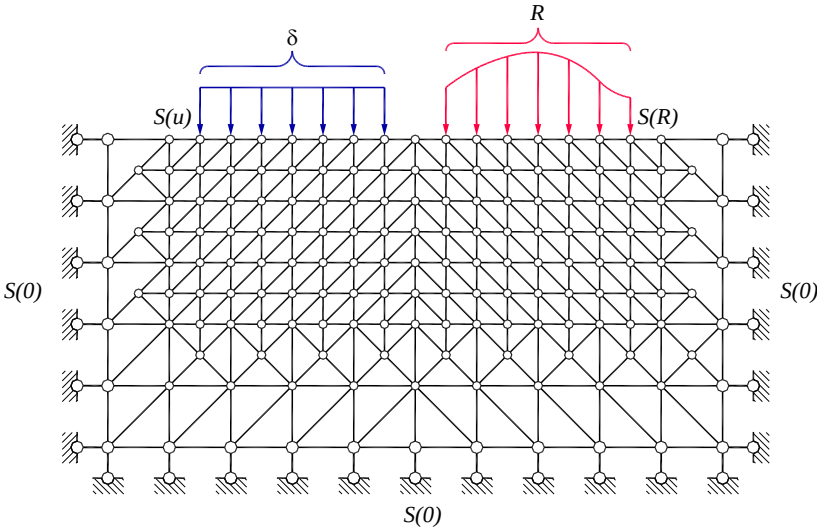


Рис. 2. Дискретна модель розрахункової області

Більшість описаних етапів є стандартними для МСЕ. Однак, для реалізації сформульованої попередньо фізично нелінійної задачі необхідно враховувати такі особливості.

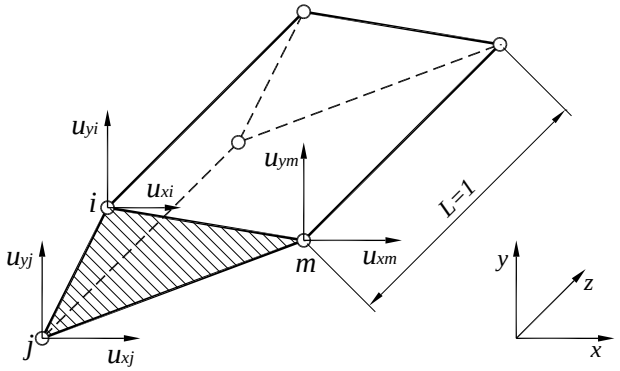


Рис. 3. Симплекс-елемент для плоскої задачі

1. Форма скінченого елемента і прийняті апроксимуючі функції повинні забезпечувати на кожному етапі розрахунку незмінність досягнутих значень напружень і деформацій в межах одного елемента, що дозволяє призначати величини змінних модулів деформації не для кожної точки області, а для кожного скінченого елемента. Це досягається вибором базового скінченого симплекс-елемента у формі трикутної призми сталої довжини $L = 1 = const$ (рис. 3).

Апроксимуюча функція, що описує характер зміни переміщень від координат *x*, *y* точок, приймається лінійною.

Переміщення $\{u\}$ довільної точки в середині елемента виражаються через вузлові переміщення $\{\delta_e\}$ його вузлів наступним співвідношенням

$$\{u\}=\begin{Bmatrix}u_x\\u_y\end{Bmatrix}=[N]\{\delta_e\}=\left[IN_i+IN_j+IN_m\right]\{\delta_e\}, \tag{18}$$

де I – одинична матриця розмірності 2×2;

N – функція форми

$$N=\frac{a+bx+cy}{2A}, \tag{19}$$

де a, b, c – коефіцієнти, які визначаються через вузлові переміщення;

A – площа елемента (об'єм $V = A\cdot 1$).

Деформації ε_x, ε_y, γ_{xy} точок скінченого елемента згідно зі співвідношеннями Коші знаходяться як похідні функції переміщень $\{u\}$. Для прийнятої лінійної апроксимації похідні не залежать від координат x, y точок елемента. Тому деформації в середині кожного елемента є сталими. В цьому легко переконатися, виконавши наступні диференціальні операції

$$\{\varepsilon_e\}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\\varepsilon_y\\\gamma_{xy}\end{Bmatrix}=[B_e]\{\delta_e\}=\left[B_i,B_j,B_m\right]\begin{Bmatrix}\delta_i\\\delta_j\\\delta_m\end{Bmatrix}, \tag{20}$$

де B_i, B_j, B_m – підматриці матриці $[B_e]$ диференціального оператора. Наприклад, підматриця $[B_i]$ має вигляд

$$[B_i]=\begin{bmatrix}\frac{\partial N}{\partial x} & 0\\0 & \frac{\partial N}{\partial y}\\\frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x}\end{bmatrix}=\frac{1}{2A}\begin{bmatrix}b_i & 0\\0 & c_i\\c_i & b_i\end{bmatrix}. \tag{21}$$

Аналогічно записуються матриці $[B_j]$, $[B_m]$.

Таким чином матриця $[B_e]$, а тому і деформації $\{\varepsilon_e\}$ не залежать від координат точок всередині елемента.

Між деформаціями $\{\varepsilon_e\}$ і напруженнями $\{\sigma_e\}$ існує однозначний зв'язок (16)

$$\{\sigma_e\}=[D_e]_{зм}\{\varepsilon_e\}.$$

Тому величини компонентів тензора напружень в межах скінченого елемента також будуть сталими на кожному етапі навантаження.

Отже, вибір скінченого симплекс-елемента у формі трикутної призми з лінійною функцією переміщень задовольняє сформульованим вище вимогам.

2. Другою принциповою особливістю задачі, що розглядається, є необхідність врахування об'ємних сил тяжіння. Без цього розрахункова область дискретного матеріалу іноді не може сприймати зовнішнє навантаження. Як показано О. Зенкевичем [9], об'ємні сили X, Y можна привести до вузлових за допомогою інтегрального співвідношення

$$\{R_e\}=-\int[N]^T\begin{Bmatrix}X\\Y\end{Bmatrix}dxdy. \tag{22}$$

Для введених форми елементів і лінійної апроксимуючої функції після інтегрування одержимо, що сила тяжіння порівну розподіляється між трьома вузлами елемента.

Процедура приведення відомих величин розподіленого навантаження P і переміщень u на границі розрахункової області до вузлових зусиль $\{R\}$ і переміщень $\{\delta\}$ не відрізняється від прийнятої для лінійних задач.

3. Наступний етап розрахунку – формулювання матриці жорсткості елемента – за прийнятих припущень також спрощується.

В загальному випадку матриця жорсткості скінченого елемента для плоскої задачі визначається виразом

$$[k_e]=\int[B_e]^T[D_e][B_e]dxdy. \tag{23}$$

З урахуванням вище зазначених припущень вираз (23) набуває вигляду

$$[k_e]=[B_e]^T[D_e]_{зм}[B_e]A. \tag{24}$$

де A – площа перерізу скінченого елемента площиною xy.

Компоненти матриці $[B_e]$ в межах скінченого елементу не залежать від координат, а матриця

деформаційних параметрів $[D_e]_{зм}$ містить змінні модулі $G_{зм}$ і $K_{зм}$, величини яких залежать від досягнутих в центрі ваги скінченого елемента напружень і деформацій.

$$[D_e]_{зм} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} K_{зм}+2G_{зм} & K_{зм}-2G_{зм} & 0 \\ K_{зм}-2G_{зм} & K_{зм}+2G_{зм} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{зм} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

де $G_{зм} = \frac{n}{m+\Gamma}\sigma_m$, $K_{зм} = 2G_{зм}\frac{1+\nu_{зм}}{1-\nu_{зм}}$.

4. Формування глобальної матриці жорсткості $[K]$ системи елементів дискретної моделі розрахункової області є відомою процедурою „складання" матриць жорсткості елементів, описаною О. Зенкевичем [9].

Після формування глобальної матриці жорсткості $[K]$ суцільна розрахункова область розглядається як звичайна механічна система деформівних елементів, розрахунок якої ведеться відомим методом переміщень будівельної механіки і зводиться до знаходження вузлових переміщень та вузлових зусиль. Для цього в шарнірних вузлах, що з'єднують між собою скінчені елементи, вводять додаткові в'язі, які перетворюють систему в кінематично визначувану. Введені в'язі дозволяють безліч можливих переміщень вузлів. Для одержання дійсних переміщень вузлів використовується принцип мінімізації потенціальної енергії системи (принцип Лагранжа).

Умова мінімуму потенціальної енергії в методі переміщень записується у вигляді системи канонічних рівнянь

$$[K]\{\delta\} = -\{R\}, \quad (26)$$

де $\{R\}$ – вектор зовнішніх сил, прикладених у вузлах системи;

$\{\delta\}$ – вектор вузлових переміщень.

За своєю фізичною сутністю канонічні рівняння (26) є рівняннями рівноваги вузлів, у яких невідомими є вузлові переміщення $\{\delta\}$.

Для одержання розв'язку конкретної задачі рівняння (26) повинні задовольняти крайовим умовам. Форма запису цих умов залежить від структури основних рівнянь і відомих значень сил та переміщень на межі розрахункової області.

Якщо на межі розрахункової області задані силові крайові умови у формі відомих вузлових сил, вони автоматично враховуються вектором $\{R\}$ зовнішніх сил (відповідні компоненти вектора прирівнюють відомим силам). Для вузлів на межі, що вільна від навантаження, компоненти вектора $\{R\}$ прирівнюють нулю.

Якщо крайові умови задані у формі відомих переміщень вузлів на межі області, вектори $\{\delta\}$ і $\{R\}$, а також матрицю жорсткості $[K]$ частково модифікують за відомою процедурою, наприклад, за процедурою, описаною в [9].

Остаточно скінчено-елементне формулювання задачі зводиться до наступних операцій.

Створюють дискретну модель розрахункової області. Для цього суцільну область замінюють сіткою скінчених елементів, що мають форму трикутних призм, з'єднаних у вузлах. Формують необхідні матриці зв'язку номерів елементів і координат вузлів, вектори відомих навантажень і переміщень, силові та кінематичні граничні умови.

Для кожного скінченого елемента формують матрицю жорсткості $[k_e]$, що задовольняє умовам рівноваги і суцільності, а також фізичним співвідношенням між напруженнями і деформаціями.

За принципом „складання" матриць жорсткості елементів формують глобальну матрицю жорсткості $[K]$ розрахункової області і записують систему лінійних рівнянь методу переміщень.

Розв'язуючи систему з урахуванням крайових умов одержують вектор вузлових переміщень

$$\{\delta\} = [K]^{-1}\{R\},$$

а через нього обчислюють деформації $\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}$ і напруження $\{\sigma\} = [D]_{зм}\{\varepsilon\}$ всередині елемента.

Описана процедура може бути реалізована для фізично нелінійної задачі тільки після розробки спеціальних обчислювальних ітераційних алгоритмів, суть яких полягає в тому, що складна фізично нелінійна задача розв'язується поетапно, коли на кожному етапі вирішується лінійна задача, в якій величини деформаційних параметрів елемента призначаються в залежності від досягнутого в ньому на попередньому етапі рівня напружень і деформацій.

Ітераційні алгоритми рішення крайової задачі дискретного середовища

Для розв'язання складної фізично-нелінійної крайової задачі механіки дискретних матеріалів запропоновано ітераційні процедури, подібні тим, що використовуються для розв'язання задач теорії пластичності, коли ітерації виконуються в межах кожного скінченого елемента, а не для усієї області, а рішення крайової задачі континуальної плоскої області введенням скінчених елементів зводиться до розв'язання системи канонічних рівнянь методу переміщень будівельної механіки з урахуванням відповідно

сформульованих крайових умов.

Для прийнятих симплекс-елементів ітераційні процедури можуть бути реалізовані одним з трьох відомих методів [9]: змінних жорсткостей, початкових напружень та початкових деформацій. Найбільш зручним для інженерного використання виявився метод змінних жорсткостей.

Відомо, що рішення задачі буде єдиним, якщо воно задовольняє умовам рівноваги, нерозривності деформацій, прийнятим в моделі законам деформування та відповідає крайовим умовам розрахункової схеми.

При розв'язанні задачі в переміщеннях з використанням МСЕ для прийнятих симплекс-елементів умова нерозривності деформацій завжди виконуються у вузлах і на гранях елемента. Розв'язання системи канонічних лінійних рівнянь методу переміщень, які за своїм змістом є рівняннями рівноваги, природно, забезпечує виконання умов рівноваги у кожному вузлі дискретної розрахункової області. Тому розрахункова процедура організовується таким чином, щоб одержані рішення відповідали також і законам деформування матеріалу. Для цього і розроблено спеціальні ітераційні алгоритми методів змінних жорсткостей, початкових напружень або початкових деформацій, які відрізняються тільки способом одержання рішень.

При розв'язанні нелінійної задачі методом змінних жорсткостей усі „нелінійності" зводять в матрицю $[D]_{зм}$ змінних деформаційних параметрів, а далі – в матрицю $[k_e]$ жорсткості елемента. Деформаційні параметри $G_{зм}$ і $K_{зм}$, що входять в ці матриці, корегуються для кожного наступного етапу ітерації в залежності від досягнутого на попередньому етапі рівня напружень і деформацій.

На першому етапі ітераційного алгоритму за цим методом розв'язують лінійну задачу однорідної області. Для усіх скінчених елементів задають одні і ті ж початкові значення модуля зсуву G_1 та модуля об'ємної деформації K_1, які призначають за результатами випробувань зразків матеріалу в умовах плоскої деформації. Формують матриці жорсткості $\left[k_1^e\right]$ кожного елемента, а за правилом „збирання" і глобальну матрицю жорсткості $[K_1]$ системи.

Розв'язують систему канонічних рівнянь методу переміщень з урахуванням крайових умов, в результаті чого визначають вектор вузлових переміщень $\{\delta\}_1$

$$\{\delta\}_1 = [K_1]^{-1}\{R\},$$

де $\{R\}$ – вектор вузлових сил.

За визначеними вузловими переміщеннями знаходять вектори досягнутих на першій ітерації деформацій $\{\varepsilon\}_1$ і напружень $\{\sigma\}_1$ в кожному елементі

$$\{\varepsilon\}_1 = [B]\{\delta\}_1,$$
$$\{\sigma\}_1 = [D]_1[B]\{\delta\}_1.$$

За цими величинами обчислюють інваріанти S_1, σ_1^m, Γ_1 тензорів напружень і деформацій. В просторі інваріантів значенням S_1, σ_1^m, Γ_1 відповідає точка A_1 (рис. 4), а напруження $\{\sigma\}_1$ і деформації $\{\varepsilon\}_1$, що одержані з рішення на першому етапі лінійної задачі, відповідають призначеним величинам модулів G_1 і K_1, але не узгоджуються з нелінійними законами деформування. Визначений з лінійного розв'язку напружено-деформований стан кожного скінченого елемента задовольняє умовам рівноваги і суцільності, але не задовольняє фізичним нелінійним рівнянням, що описують поверхню деформування матеріалу. Тому одержана точка A_1 (рис. 4) в загальному випадку не лежить на поверхні деформування. Досягнутій деформації Γ_1 на цій поверхні відповідає точка a_1. Відрізок A_1a_1 відображає різницю між лінійним і нелінійним розв'язком (нев'язку).

Для зменшення нев'язки проводять наступні ітерації.

На другій ітерації призначають нові значення модулів деформації $G_2 = \dfrac{S_1}{\Gamma_1} = \dfrac{n}{m+\Gamma_1}\sigma_1^m$; $K_2 = 2G_2\dfrac{1+\nu}{1-\nu}$, свої для кожного елемента, і розв'язують лінійну задачу вже для неоднорідної області, оскільки деформаційні параметри G_2 і K_2 будуть різними для кожного скінченого елемента. Далі формують матриці жорсткості $\left[k_2^e\right]$ елементів, глобальну матрицю жорсткості $[K_2]$ системи, знаходять вузлові переміщення $\{\delta\}_2$, деформації $\{\varepsilon\}_2$ і напруження $\{\sigma\}_2$ в усіх елементах. Підраховують інваріанти S_2, σ_2^m, Γ_2 одержаних на другому етапі тензорів напружень і деформацій, визначають нев'язку між лінійним рішенням і поверхнею деформування. Якщо нев'язка більша наперед заданої малої величини,

продовжують ітераційний процес з модулями деформації $G_3 = \frac{S_2}{\Gamma_2} = \frac{n}{m+\Gamma_2}\sigma_2^m;\quad K_3 = 2G_3\frac{1+\nu_{зм}}{1-\nu_{зм}}$.

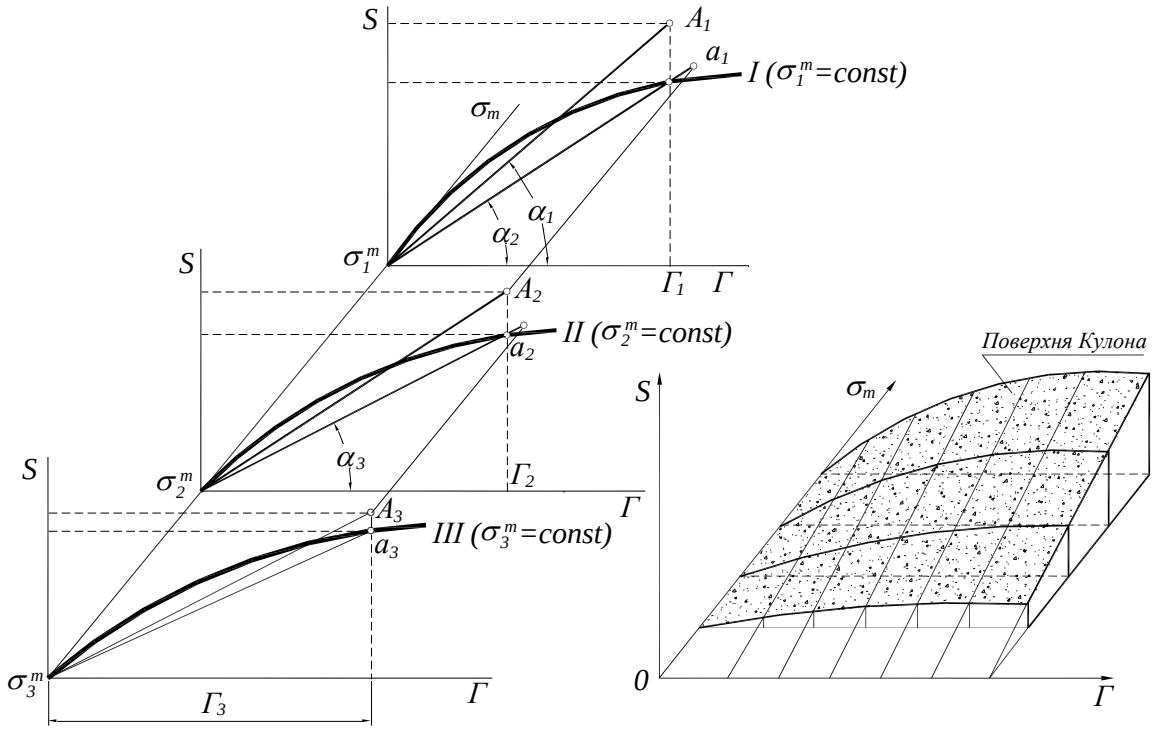


Рис. 4. Графічне представлення ітераційного процесу

Описаний процес наглядно ілюструється побудовами, що показані на рис. 4.

Лінійному рішенню на першому етапі в просторі інваріантів Γ, S, σ_m відповідає точка $A_1\left(\Gamma_1, S_1, \sigma_1^m\right)$ і крива *I*, що є зрізом поверхні деформування площиною $\sigma_1^m = const$, а досягнутому рівню деформацій Γ_1 – точка a_1 на кривій *I*. Відрізок A_1a_1 розглядається як нев'язка між лінійним і нелінійним рішеннями. Модуль зсуву G_2, що використовується на 2-му етапі ітерації дорівнює тангенсу кута нахилу січної O_1a_1 $\left(G_2 = \mathrm{tg}\alpha_2\right)$. Відповідно для третього етапу $G_3 = \mathrm{tg}\alpha_3$ і т.д. Таким чином, на кожному наступному етапі ітераційного процесу величини модулів деформації призначають за напружено-деформативним станом, досягнутим в елементі на попередньому етапі. Процес закінчується на *k*-му етапі, коли нев'язка ξ стає меншою прийнятої допустимої величини $[\xi]$

$$\xi = \left|\frac{S_л^{(k)} - S_T^{(k)}}{S_T^{(k)}}\right| \le [\xi],$$

де $S_л^{(k)}$ – значення інваріанта тензора напружень, що відповідає досягнутим в лінійному рішенні деформаціям $\Gamma^{(k)}$;

$S_T^{(k)}$ – значення інваріанта тензора напружень, що знаходиться з нелінійного фізичного співвідношення

$$S_T^{(k)} = \frac{n\Gamma^{(k)}}{m+\Gamma^{(k)}}\sigma_{(k)}^m.$$

Рекурентні залежності, що описують запропонований алгоритм для *k*-го етапу, можна записати таким чином:

$$\left.\begin{aligned} G_{зм}^{(k)} &= \frac{S^{(k-1)}}{\Gamma^{(k-1)}}; \\ K_{зм}^{(k)} &= 2G_{зм}^{(k)}\frac{1+\nu}{1-2\nu}; \end{aligned}\right\}$$ – корегування деформаційних параметрів;

$\left[D^{(k)}\right]_{зм} = [D]\left(G_{зм}^{(k)}, K_{зм}^{(k)}\right)$ – формулювання нової матриці деформаційних параметрів;

$\left[k_e^{(k)}\right]=[B]^T\left[D^{(k)}\right]_{зм}[B]A\to[K^{(k)}]$ – формування матриці жорсткості кожного скінченого елемента;

$\left[K^{(k)}\right]\ \left\{\delta^{(k)}\right\}=\{R\}$ – формування системи рівнянь методу переміщень;

$\left\{\delta^{(k)}\right\}=\left[K^{(k)}\right]^{-1}\{R\}$ – визначення вузлових переміщень лінійних алгебраїчних рівнянь (розв'язання системи лінійних рівнянь методу переміщень);

$\left\{\varepsilon^{(k)}\right\}=\left[B^{(k)}\right]\left\{\delta^{(k)}\right\}\to\Gamma^{(k)}$ – обчислення деформацій;

$\left\{\sigma^{(k)}\right\}=\left[D^{(k)}\right]\left[B^{(k)}\right]\left\{\delta^{(k)}\right\}\to S^{(k)},\ \sigma_{(k)}^m$ – обчислення напружень;

$S_T^{(k)}=\dfrac{n\Gamma^{(k)}}{m+\Gamma^{(k)}}\sigma_{(k)}^m$ – визначення величини інваріанту, що відповідає поверхні деформування;

$\xi=\left|\dfrac{S^{(k)}-S_T^{(k)}}{S_T^{(k)}}\right|\leftrightarrow[\xi]$ – перевірка розходження.

Відмінність описаної ітераційної процедури від відомих процедур теорії пластичності полягає в тому, що "зближення" відбувається не в одній площині напружень – деформацій $(S-\Gamma)$, а в тривимірному просторі $(S-\Gamma-\sigma_m)$. Положення кожної кривої $\left(S^{(k)}-\Gamma^{(k)}\right)$ визначається рівнем досягнутого стискуючого напруження σ_k^m.

Для розв'язання нелінійної крайової задачі механіки дискретних матеріалів з використанням описаних ітераційних процедур за участі авторів статті розроблено спеціальний програмний комплекс GEO, який об'єднує програми, що реалізують окремі процедури ітераційного процесу [10], а також створено лабораторне забезпечення, необхідне для практичного використання програмного комплексу.

Можливість використання цього програмного комплексу для розв'язання крайової задачі дискретних матеріалів показана в [11].

Висновки. В статті описані співвідношення, що формулюють плоску крайову задачу дискретного середовища, яка класифікується як фізично-нелінійна задача неоднорідної області, що деформується за законами реологічної моделі Кулона. Наведено скінчено-елементне формулювання задачі, що в поєднанні зі спеціальними ітераційними процедурами дозволяє розв'язувати задачу відомим методом скінчених елементів.

Література

1. Ковтун В. В. Основи механіки дискретних матеріалів : монографія / В. В. Ковтун, О. А. Дорофєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – 131 с.

2. Ковтун В. В. Експериментальне обґрунтування вихідних положень механіки дискретного середовища і визначення розрахункових параметрів моделей / В. В. Ковтун, О. А. Дорофєєв // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 3. – С. 20–27.

3. Reynolds O. Experiments showing dilatancy, a property of granular material / O. Reynolds. – Proc. Roy. Inst. 2, 1886. – P. 354–363.

4. А. с. 1158925 СССР. Прибор для исследований свойств грунта в условиях плоской деформации / В. В. Ковтун, В. Г. Безносюк, Н. А. Мазур. – № 3673183/29-33 ; заявл. 16.12.83 ; опублик. 30.05.85, Бюл. № 20.

5. А. с. 1141158 СССР. Нагрузочное устройство для испытаний грунтов в приборах трехосного сжатия / В. В. Ковтун, В. Г. Безносюк, Н. А. Мазур. – № 3673169/29-33 ; заявл. 16.12.83 ; опублик. 23.02.85, Бюл. № 7.

6. Ковтун В. В. Визначальні співвідношення механіки дискретного середовища / В. В. Ковтун // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – №5. – С. 69–76.

7. Пат. 11675 Україна, МПКG01N 33/24. Спосіб визначення деформаційних параметрів пористих матеріалів за результатами лабораторних випробувань / В. В. Ковтун, О. В. Багрій ; власник Хмельн. нац. ун-т. – № 200503929 ; заявл. 25.04.2005 ; опублік. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 3 с.

8. Пат. 18390 Україна, МПКG01N 33/24. Пристрій для лабораторних випробувань пористих матеріалів / В. В. Ковтун, О. В. Багрій ; власник Хмельн. нац. ун-т. – № 200603878 ; заявл. 07.04.2006 ; опублік. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 4 с.

9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

10. Ковтун В. В. Метод конечных элементов в портовом гидротехническом строительстве / В. В. Ковтун, В. Т. Бугаев – М. : Мортехинформреклама, 1987. – 48 с.

11. Багрій О. В. Деформування середовища з урахуванням внутрішнього кулонового тертя в умовах

плоскої деформації : дис. … канд. техн. наук : 01.02.04 / Багрій Олена Вікторівна ; Мін-во освіти і науки України, Хмельницький національний університет. – Хмельницький, 2009. – 145 с.

References

1. Kovtun V. V. Osnovy mekhaniky dyskretnykh materialiv : monohrafiia / V. V. Kovtun, O. A. Dorofieiev. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – 131 s.

2. Kovtun V. V. Eksperymentalne obgruntuvannia vykhidnykh polozhen mekhaniky dyskretnoho seredovyshcha i vyznachennia rozrakhunkovykh parametriv modelei / V. V. Kovtun, O. A. Dorofieiev // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2011. – № 3. – S. 20–27.

3. Reynolds O. Experiments showing dilatancy, a property of granular material / O. Reynolds. – Proc. Roy. Inst. 2, 1886. – P. 354–363.

4. A. s. 1158925 SSSR. Pribor dlya issledovanij svojstv grunta v usloviyah ploskoj deformacii / V. V. Kovtun, V. G. Beznosyuk, N. A. Mazur. – № 3673183/29-33 ; zayavl. 16.12.83 ; opublik. 30.05.85, Byul. № 20.

5. A. s. 1141158 SSSR. Nagruzochnoe ustrojstvo dlya ispytanij gruntov v priborah trehosnogo szhatiya / V. V. Kovtun, V. G. Beznosyuk, N. A. Mazur. – № 3673169/29-33 ; zayavl. 16.12.83 ; opublik. 23.02.85, Byul. № 7.

6. Kovtun V. V. Vyznachalni spivvidnoshennia mekhaniky dyskretnoho seredovyshcha / V. V. Kovtun // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2008. – №5. – S. 69–76.

7. Pat. 11675 Ukraina, MPKG01N 33/24. Sposib vyznachennia deformatsiinykh parametriv porystykh materialiv za rezultatamy laboratornykh vyprobuvan / V. V. Kovtun, O. V. Bahrii ; vlasnyk Khmeln. nats. un-t. – № 200503929 ; zaiavl. 25.04.2005 ; opublik. 16.01.2006, Biul. № 1. – 3 s.

8. Pat. 18390 Ukraina, MPKG01N 33/24. Prystrii dlia laboratornykh vyprobuvan porystykh materialiv / V. V. Kovtun, O. V. Bahrii ; vlasnyk Khmeln. nats. un-t. – № 200603878 ; zaiavl. 07.04.2006 ; opublik. 15.11.2006, Biul. № 11. – 4 s.

9. Zenkevich O. Metod konechnyh elementov v tehnike / O. Zenkevich. – M. : Mir, 1975. – 541 s.

10. Kovtun V. V. Metod konechnyh elementov v portovom gidrotehnicheskom stroitelstve / V. V. Kovtun, V. T. Bugaev – M. : Mortehinformreklama, 1987. – 48 s.

11. Bahrii O. V. Deformuvannia seredovyshcha z urakhuvanniam vnutrishnoho kulonovoho tertia v umovakh ploskoi deformatsii : dys. … kand. tekhn. nauk : 01.02.04 / Bahrii Olena Viktorivna ; Min-vo osvity i nauky Ukrainy, Khmelnytskyi natsionalnyi universytet. – Khmelnytskyi, 2009. – 145 s.

Надійшла / Paper received : 05.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-173-177
УДК 66.045

М.В. МАРЧЕНКО, В.О. ХАРЖЕВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ТА РОЗМІРНОСТЕЙ

У статті представлено метод оптимізації гідродинамічних та теплових параметрів теплообмінного обладнання. Запропонований метод ґрунтується на використанні CFD-додатку SolidWorks Flow Simulation в поєднанні з методами теорії подібності та розмірностей. Отримане в результаті досліджень критеріальне рівняння дозволяє швидко знаходити параметри моделі, які задовольняють умови оптимізації.

Ключові слова: теплообмінник, оптимізація, теорія подібності та розмірностей, обчислювальна гідродинаміка.

M.V. MARCHENKO, V.O. KHARZHEVSKYI
Khmelnytskyi National University

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL PARAMETERS OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT BASED ON SIMILARITY THEORY AND DIMENSIONAL ANALYSIS

The technique of optimization of hydrodynamic and thermophysical parameters of countercurrent heat exchanger is given in the article. The presented technique is based on the usage of computational fluid dynamics (CFD) application SolidWorks Flow Simulation with subsequent approximation of the obtained data by the criterion equation based on similarity theory and dimensional analysis. It is known that the course of processes occurring in the heat exchange equipment is influenced by a large number of parameters, in particular geometric sizes, thermophysical properties of heat carriers etc. Therefore, the optimization problem is multifactorial and in order to simplify the mathematical model, it was decided to use the methods of similarity and dimension theory. As an optimization criterion was chosen the efficiency of the heat exchanger that is an integrated characteristic of the optimal operation of heat exchangers. The proposed methods of parametric optimization of geometric and mode parameters of the shell-and-tube heat exchanger, although the proposed technique can be extended to other types of heat exchange equipment. The database containing information about all the parameters of the studied models allows for multifactor analysis in MathCAD 15 application in order to establish the unknown constants of the criterion equation. The obtained criterion equation allows to quickly find the appropriate modes of operation of the heat exchanger that satisfy the conditions of the objective function.

Key words: heat exchanger, optimization, similarity theory, dimensional analysis, computational fluid dynamics.

Постановка проблеми. Поєднання новітніх комп'ютерно-інтегрованих технологій з класичними методами досліджень представляє собою надзвичайно ефективний інструмент в руках науковця, що досліджує певні процеси, а також надає змогу швидко та якісно проектувати нові конструкції обладнання та оптимізувати вже існуючі. У представлених дослідженнях було поєднано методи обчислювальної гідродинаміки, що реалізувались за допомогою CFD-додатку SolidWorks FlowSimulation, з методами теорії подібності процесів масо- та теплопередачі, які дозволили представити оптимізаційну модель у вигляді критеріального рівняння, зручного для аналізу. Система тривимірного моделювання SolidWorks та інтегрований додаток FlowSimulation може використовуватися при вивченні гідродинаміки і теплопередачі широкого спектра технологічного обладнання з метою визначення ефективності протиточного теплообмінного обладнання та аналізу його гідродинамічного опору, а також температурних полів потоку всередині нього [1]. За допомогою FlowSimulation можна легко визначити ефективність теплообмінника, а шляхом дослідження потоку і розподілу температур можна одержати уявлення про фізичні процеси, які відбуваються в теплообміннику, що дасть ідеї з покращення його конструкції.

Аналіз останніх досліджень. На даний момент проведена значна кількість досліджень, які присвячені оптимальному проектуванню теплообмінного обладнання [2–6]. Відомо, що на протікання процесів, які відбуваються в теплообмінному обладнанні має вплив велика кількість параметрів, зокрема геометричних та режимних, теплофізичних властивостей сировини [6]. Тому поставлена задача оптимізації є багатофакторною і з метою спрощення математичної моделі було вирішено скористатись методами теорії подібності та розмірностей [7]. Результати робіт, присвячених основам теорії подібності та розмірностей, дають змогу скоротити кількість визначальних факторів, які впливають на гідродинамічні та теплові процеси, що протікають в теплообмінному обладнанні. Це значно скорочує кількість обчислювальних ітерацій при оптимізаційному пошуку і дозволяє швидко знайти ряд визначальних параметрів, які задовольняють умові оптимізації. У роботі наведені методи параметричної оптимізації геометричних та режимних параметрів роботи кожухотрубного теплообмінника, хоча запропонована методика може бути поширена і на інші типи теплообмінного обладнання.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 представлена параметризована твердотільна модель кожухотрубного теплообмінника, яка створена в системі SolidWorks. Схема руху теплоносії показана на рис. 2. За допомогою інструментів додатку FlowSimulation було задано ряд геометричних і режимних параметрів, для яких розраховувались вихідні параметри, що можуть бути використані в процесі оптимізації, а саме: коефіцієнт теплопередачі між теплоносіями, ККД теплообмінника, його гідравлічний опір тощо.

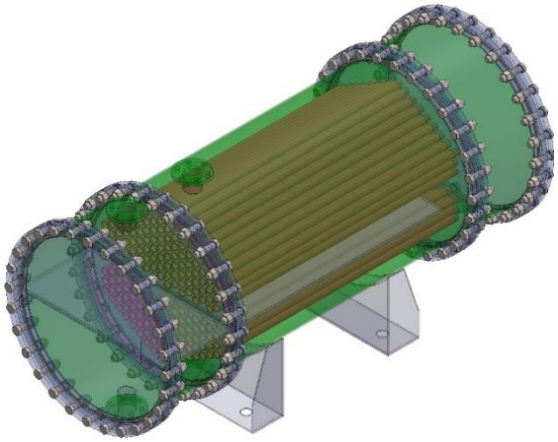


Рис. 1. Твердотіла модель кожухотрубного теплообмінника

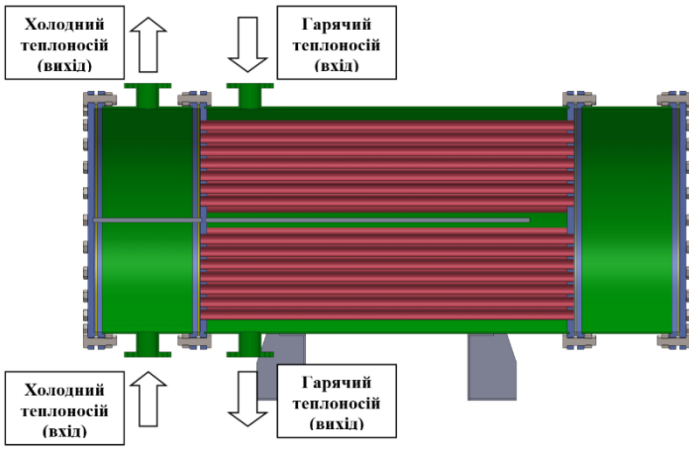


Рис. 2. Схема руху теплоносіїв

У якості критерія оптимізації було обрано ККД теплообмінника – параметр, який є інтегральною характеристикою ефективності роботи теплообмінника. Для його визначення скористаємось наступними міркуваннями.

Фактична теплопередача від гарячого до холодного теплоносія може бути обчислена або як втрата енергії гарячим текучим середовищем, або енергія, отримана холодним текучим середовищем [6]. Максимально можлива теплопередача досягається, якщо одне з текучих середовищ піддалося температурним змінам, рівним максимальній різниці температур у теплообміннику, яка становить різницю між температурою холодного і гарячого текучого середовища на вході в теплообмінник:

$$T_г^{вх} - T_х^{вх},$$

де $T_г^{вх}$ та $T_х^{вх}$ – температури відповідно гарячого та холодного теплоносіїв на вході в теплообмінник, *К*.

Таким чином, ККД протиточного теплообмінника у випадку якщо коефіцієнт потужності гарячого текучого середовища менший коефіцієнта потужності холодного:

$$\varepsilon = \frac{T_г^{вх} - T_г^{вих}}{T_г^{вх} - T_х^{вх}},$$

де $T_г^{вих}$ та $T_х^{вих}$ – температури відповідно гарячого та холодного теплоносіїв на виході з теплообмінника, *К*.

Якщо ж коефіцієнт потужності гарячого текучого середовища більший коефіцієнта потужності холодного, то ККД теплообмінника дорівнюватиме:

$$\varepsilon = \frac{T_г^{вх} - T_х^{вх}}{T_х^{вих} - T_х^{вх}}.$$

У результаті наших досліджень було обчислено ККД протиточного теплообмінника. У процесі розрахунку також визначалась середня температура трубок теплообмінника. Отримане значення температури може використовуватися надалі для розрахунків на міцність і втому.

Параметризація моделі, яка характерна для системи автоматизованого проектування SolidWorks, дозволяє оперативно змінювати її геометричні розміри, що призведе до негайної перебудови і перерахунку всіх залежних параметрів. Інструменти SolidWorks FlowSimulation дозволяють також проводити багатоваріантні дослідження шляхом поступової зміни одного чи декількох параметрів оптимізації без участі оператора. У нашому випадку це дозволило отримати велику базу даних значень цільової функції (гідродинамічного опору, коефіцієнта корисної дії та теплопередачі теплообмінника) залежно від сукупності вхідних параметрів оптимізації (розмірів теплообмінника, діаметра труб, які в ньому використовуються, витрат теплоносіїв та їх теплофізичних властивостей тощо). Наявність такої бази даних дозволяє швидше знайти глобальний мінімум цільової функції, уникнувши великої кількості розрахункових операцій, що мають місце при прямих методах оптимізаційного пошуку. Отримана база даних параметрів відкриває можливості для створення математичної моделі, яка, як відомо, краще піддається оптимізації пошуковими методами.

Адекватність комп'ютерної моделі, створеної за допомогою SolidWorks Flow Simulation, попередньо можна оцінити з картин параметрів у різних поперечних перерізах твердотілої моделі. Так, на рис. 3 показана картина температурного поля в поперечному перерізі теплообмінника.

Оскільки розвиток природи ґрунтується на законах геометричної прогресії, степеневих залежностях і випадкових процесах, то показникові рівняння найбільш часто визначають суть перебігу процесу з точки зору фізичних та більш загальних характеристик. Як результат, залежність між параметрами процесу може бути представлена за допомогою рівняння:

$$K_1 = CK_2^m K_3^n ... K_\pi^p,$$

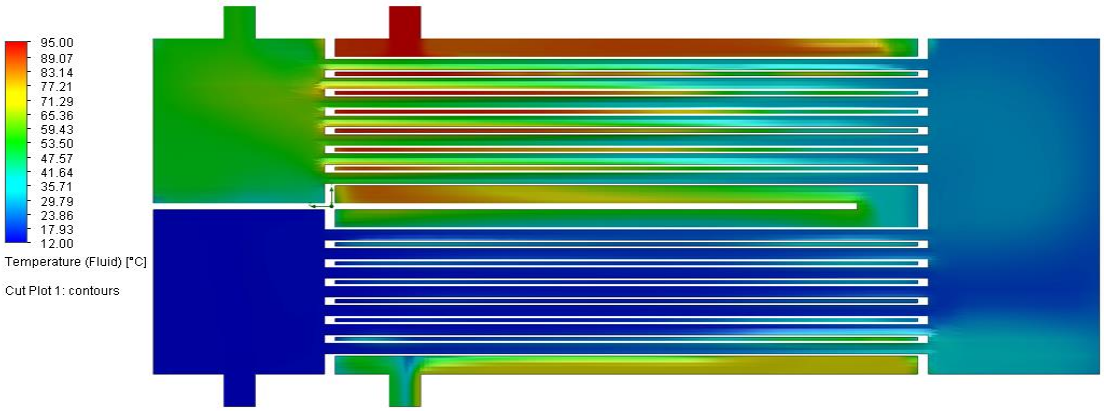


Рис. 3. Картина розподілу температур в поперечному перерізі теплообмінника

де *C, m, n, p* – константи, які необхідно знайти шляхом математичного аналізу експериментальних даних.

Критеріальне рівняння встановлює зв'язок між безрозмірними комплексами – критеріями. Задача встановлення вигляду комплексів, що входять до складу рівняння, розв'язується багатьма методами: безпосередньо з диференціального рівняння процесу; методом подібних перетворень з представленням констант подібності; методом ділення вихідного рівняння на один з його членів; методом перетворення до нових незалежних одиниць вимірювання фізичних величин тощо. Проте використання всіх цих методів вимагає наявності вихідного рівняння. При відсутності такого рівняння, яке описує процес, зазвичай використовують метод аналізу розмірностей. Використання цього методу полягає на логіці вибору фізичних величин, які визначають перебіг процесу, однак це може дати позитивний ефект лише у випадку вибору вихідних факторів, що не завжди можливо при вивченні процесів, що раніше не досліджувались.

Теорема Бекінгема (π-теорема) встановлює зв'язок між *N* фізичними величинами, розмірність яких виражається через *n* основних одиниць вимірювання та кількістю π параметрів подібності [7]:

$$\pi = N - n. \tag{1}$$

Перехід від розмірних характеристик процесу до безрозмірних не тільки звужує область використання данного рівняння, але й призводить до зменшення кількості змінних величин. Друга теорема подібності (теорема Федермана-Бекінгема) говорить про те, що числові результати дослідів повинні бути представлені у вигляді рівняння, яке виражає залежність між подібними параметрами процесу, що вивчається. Тобто

$$K_1 = f\left(K_2, K_3, ..., K_\pi\right), \tag{2}$$

де π – кількість критеріїв подібності, які знайдені за допомогою рівняння (1).

Згідно з роботою [6] до найважливіших факторів, які характеризують теплопередачу між двома середовищами відносять: геометричний параметр моделі *D*; коефіцієнт тепловіддачі α теплоносія до розділювальної стінки; коефіцієнт теплопередачі λ теплоносія; густина теплоносія ρ; швидкість руху теплоносія *v*; динамічна в'язкість теплоносія μ; питома теплоємність теплоносія *c*.

Створимо матрицю розмірностей, кожен стовпчик якої визначається через основні одиниці системі СІ (рис. 4).

	D	*α*	*λ*	*ρ*	*μ*	*c*	*v*
L (довжина)	1	0	1	-3	-1	2	1
M (маса)	0	1	1	1	1	0	0
T (час)	0	-3	-3	0	-1	-2	-1
t (температура)	0	-1	-1	0	0	-1	0

Рис. 4. Матриця розмірностей критеріального рівняння

Зі всієї множини параметрів, які визначають процес, необхідно вибрати *N* – *n* таких, щоб детермінант матриці *M*, отриманої з розмірностей вибраних величин, не дорівнював нулю. Позначимо ці величини A_D, а решту – A_U.

Виберемо у якості визначальних величин *D, λ, μ, v.* Тоді

$$|M| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -3 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 1 \neq 0.$$

Визначимо матрицю показників степенів критеріїв подібності за допомогою рівняння:

$$K_i = M^{-1} A_{Ui},$$

де M^{-1} – матриця, обернена до матриці M, $i = 1 \ldots N - n$.

Отже, матриця показників степенів фізичних величин, що належать критеріям подібності, матиме вигляд (рис. 5):

	D	α	λ	ρ	μ	c	v
K_1	1	1	-1				
K_2	1			1	-1		1
K_3			-1		1	1	

Рис. 5. Матриця показників степенів критеріального рівняння

Таким чином,

$$K_1 \equiv \frac{D\alpha}{\lambda};\ K_2 \equiv \frac{D\rho v}{\mu};\ K_3 \equiv \frac{\mu c}{\lambda}.$$

Неважко також помітити, що знайдені критерії подібності є відомими критеріями теплообмінних конвективних процесів, а саме:

$$\frac{D\alpha}{\lambda} = Nu;\ \frac{D\rho v}{\mu} = Re;\ \frac{\mu c}{\lambda} = Pr.$$

Отже, залежність (2) набуває вигляду

$$K_1 = CK_2^m K_3^n \text{ або } \frac{D\alpha}{\lambda} = C\left(\frac{D\rho v}{\mu}\right)^m \left(\frac{\mu c}{\lambda}\right)^n,$$

де C, m і n – константи, які необхідно знайти за допомогою аналізу експериментальних даних.

На рис. 6 показаний алгоритм знаходження критеріїв подібності, який реалізовано в системі програмування Microsoft Visual Studio (рис. 7).

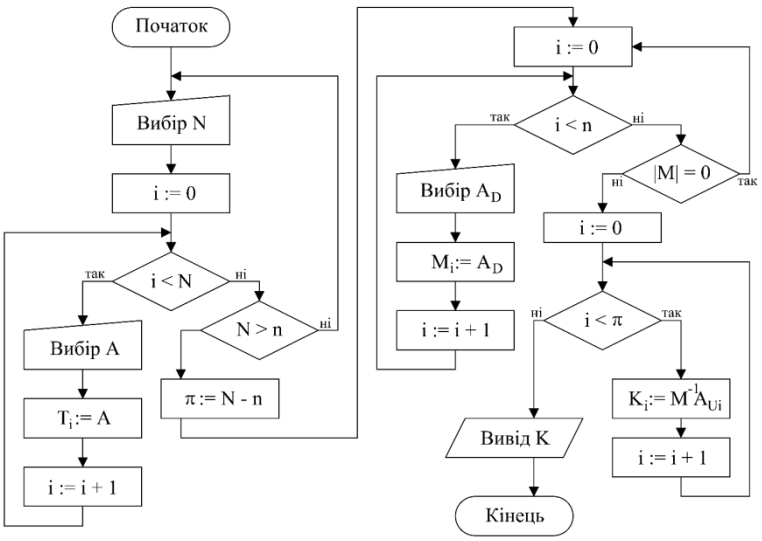


Рис. 6. Алгоритм визначення критеріїв подібності

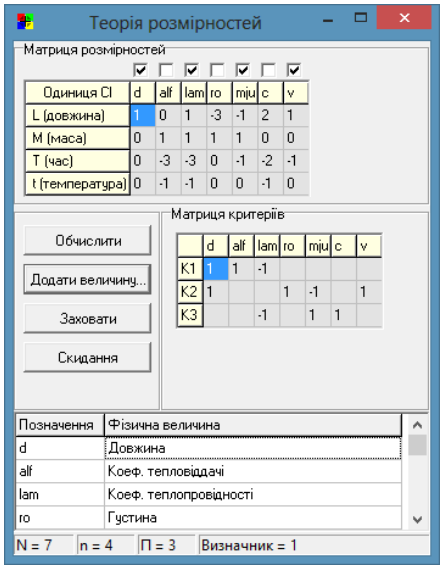


Рис. 7. Головне вікно програми «Теорія розмірностей»

Символьні позначення на схемі наступні: N – кількість параметрів оптимізації; i – поточний параметр оптимізації; n – кількість основних одиниць, якими виражені параметри оптимізації; A – вектор-стовбець основних одиниць вимірювання, які виражають i-й параметр; π – кількість критеріїв подібності, які характеризують природу процесу; A, M – матриці проміжних результатів; K – матриця кінцевих результатів.

Реалізуючи раніше викладений математичний апарат, наведений алгоритм та відповідне розроблене програмне забезпечення дозволяє формувати критерії подібності з довільної множини фізичних величин, що у свою чергу надає широкі можливості дослідникам в багатьох сферах науки і техніки. Створена програма є багатоцільовою і допомагає встановлювати безрозмірні комплекси для багатьох процесів і явищ, які можуть бути досліджені за допомогою теорії подібності.

База даних, що містить відомості про всі параметри досліджуваних моделей дозволяє провести багатофакторний аналіз в пакеті MathCAD 15 метою встановлення невідомих констант критеріального рівняння [8].

На рис. 8 показана залежність між критеріями в логарифмічній системі координат, внаслідок чого графіки залежностей вироджуються в прямі лінії. В процесі аналізу за допомогою вбудованих в MathCAD

функцій, для даної конструкції теплообмінника було встановлено, що C = 0,017, m = 0,76, n = 0,51. Якщо ж представити критеріальне рівняння у вигляді просторового графіка, то залежність ця графічно виглядатиме як показано на рис. 9.

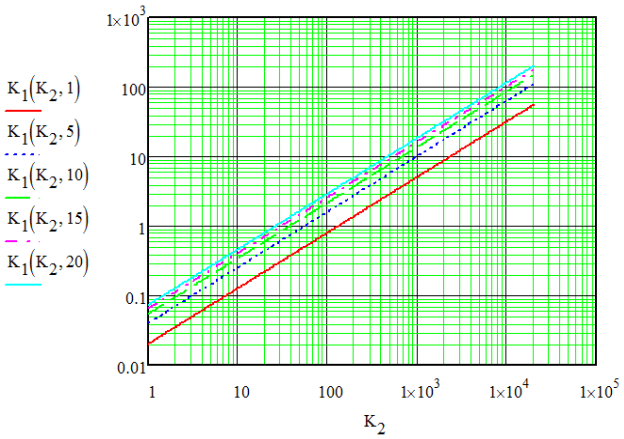


Рис. 8. Залежність між критеріями у вигляді плоского графіка у логарифмічній системі координат

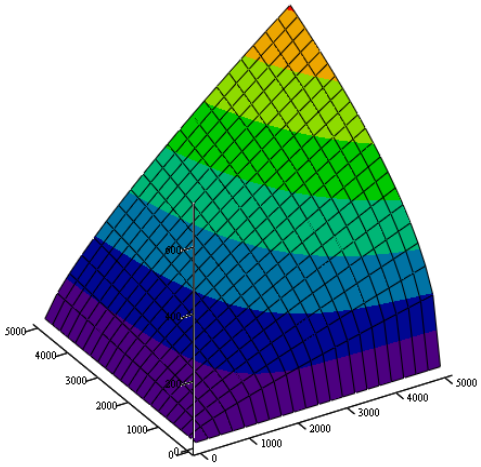


Рис. 9. Залежність між критеріями у вигляді просторової поверхні

Висновки. Таким чином внаслідок проведених досліджень було розроблено методику аналізу теплових та гідродинамічних процесів, яку реалізовано за допомогою CFD-додатку SolidWorks Flow Simulation та методів теорії подібності; створено базу даних отриманих результатів, яка слугує основою для отримання математичної моделі роботи теплообмінника, що підлягає оптимізації; за допомогою теорії розмірностей встановлено якісний і кількісний взаємозв'язок між параметрами у формі критеріального рівняння; за допомогою математичного пакету MathCAD 15 проведено числовий аналіз отриманого рівняння, а також оптимізацію параметрів теплообміну з метою отримання максимальної ефективності передачі теплоти від гарячого до холодного теплоносія.

Література

1. Алямовский А.А. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов. – СПб : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

2. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O. Optimal design of plate and frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries, Energy, 2011, vol. 36, pp. 4588–4598.

3. Liu C., Bu W., Xu D. Multi-objective shape optimization of a plate-fin heat exchanger using CFD and multi-objective genetic algorithm, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, vol. 111, 65–82.

4. Raja B.D., Patel V.K., Jhala R.L. Thermal design and optimization of fin-and-tube heat exchanger using heat transfer search algorithm, Thermal Science and Engineering Progress, 2017, vol. 4, pp. 45–57.

5. Справочник по теплообменникам : в 2 т. Т. 1 / пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

6. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / Х. Хаузен ; пер. с немецк. – М. : Энергоиздат, 1981. – 384 с.

7. Новиков И.И. Теория подобия в термодинамике и теплопередаче / И.И. Новиков, В.М. Боришанский. – М. : Атомиздат, 1979. – 184 с.

8. Макаров Е. Инженерные расчеты в Mathcad 15 : учебный курс / Е. Макаров – СПб : Питер, 2011. – 400 с.

References

1. Alyamovskij A.A. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike / A.A. Alyamovskij, A.A. Sobachkin, E.V. Odincov. – SPb. : BHV-Peterburg, 2005. 800 s.

2. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O. Optimal design of plate and frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries, – Energy, 2011, vol. 36, pp. 4588–4598.

3. Liu C., Bu W., Xu D. Multi-objective shape optimization of a plate-fin heat exchanger using CFD and multi-objective genetic algorithm, – International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, vol. 111, 65–82.

4. Raja B.D., Patel V.K., Jhala R.L. Thermal design and optimization of fin-and-tube heat exchanger using heat transfer search algorithm, – Thermal Science and Engineering Progress, 2017, vol. 4, pp. 45–57.

5. Spravochnik po teploobmennikam: V 2-h t. T.1 / Per. s angl., pod red. B.S. Petuhova, V.K. SHikova. M. : Energoatomizdat, 1987. 560 s.

6. Hauzen H. Teploperedacha pri protivotoke, pryamotoke i perekrestnom toke : Per. s nemeck. / H.Hauzen. – M. : Energoizdat, 1981. – 384 s.

7. Novikov I.I. Teoriya podobiya v termodinamike i teploperedache / I.I. Novikov, V.M. Borishanskij. – M. : Atomizdat, 1979. – 184 s.

8. Makarov E. Inzhenernye raschety v Mathcad 15: uchebnyj kurs / E. Makarov – SPb.: Piter, 2011. – 400 s.

Надійшла / Paper received : 06.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-178-183
УДК 339:519.8

Я.П. РОМАНЧУК, Б.І. СОКІЛ, А.В. БАРАНОВ
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ЕКСКАВАТОРІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

У статті розглянуто використання методу аналізу ієрархій Т. Сааті для оптимального вибору управлінського рішення. Наведено основні етапи розв'язування задачі. Практичне використання методу аналізу ієрархій проілюстроване на задачі про оцінювання технічного рівня деяких моделей екскаваторів. Обґрунтований підхід до оцінки критеріїв у випадку суперечливості чи недостатньої інформації щодо окремих критеріїв.

Ключові слова: *прийняття рішень, метод аналізу ієрархій Т. Сааті, експертне оцінювання критеріїв.*

Y.P. ROMANCHUK, B.I. SOKIL, A.V. BARANOV
Hetman Petro Sahaidachny National Military Academy, s. Lviv

EVALUATION OF TECHNICAL LEVEL EXCAVATORS BASED ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

An approach to solving a multi-criteria evaluation problem is proposed, which is based on the application of the analytic hierarchy process in case of inconsistency or insufficiency of information on certain criteria. This approach allows you to convert qualitative estimates of criteria into their numerical values. The sequence of actions of the analytic hierarchy process for making managerial decisions concerning a choice from a number of excavator models the best on its technical level is well-grounded and investigated. A three-level hierarchical structure (goal, criteria and alternatives) was built. After that, the significance of the criteria as well as the significance of the alternatives according to different criteria was evaluated by pair wise comparisons. As a result, normalized vectors of local priorities of criteria and alternatives were obtained. The calculated values of the estimates consistency showed that they are within acceptable limits. The solution of the problem was found as the maximum component of the global priority vector, which was obtained as the product of the matrix formed by the normalized vectors of local alternatives priorities and the vector-column of local criteria priorities. The obtained solution of the problem of estimating the technical level of the considered models of excavators is illustrated graphically. The use of the analytic hierarchy process allowed to assess the technical level of the considered excavator's models and to rank the latter according to their technical level. The method described in the article can be applied to a wide range of problems of assessing the technical level of various objects in terms of incomplete or inconsistent information.

Key words: decision making, T. Saaty analytic hierarchy process, expert evaluation of criteria.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку економіки та суспільства в цілому висуває високі вимоги до прийняття управлінських рішень. Задачі управління стають дедалі складнішими й вимагають від особи, що приймає рішення, не лише досвіду, інтуїції, але й глибоких теоретичних знань. Крім того, стратегічні, тактичні та оперативні рішення часто доводиться приймати в умовах невизначеності, неточності та неповноти інформації. Використання науково обґрунтованих методів, зокрема методів математичного моделювання, дозволяє зробити цей процес більш прозорим і об'єктивним. У статті розглянуто метод аналізу ієрархій [1] стосовно задачі оцінювання. Як відомо, цей метод є загальним методом розв'язування широкого класу слабко структурованих задач прийняття рішень при наявності багатьох критеріїв і дозволяє поєднати математичний апарат із досвідом та інтуїцією особи, що приймає рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі прийняття рішень за наявності багатьох критеріїв присвячені праці відомих вітчизняних і зарубіжних учених як у сфері економіки так і математичного моделювання. Це, насамперед, Т. Сааті, В. Вітлінський, А. Лотов, С. Наконечний, М. Перестюк, О. Тригуб і багато інших. У науковій літературі за останні роки появилася значна кількість робіт, присвячених, зокрема, вирішенню проблем оцінювання економічної ефективності інвестиційних та економічних проектів [2–5], оцінювання рівня енергоефективності [6], постачальників [7, 8], прийняття управлінських рішень в малому підприємництві [9], розроблення організаційної структури Збройних Сил України за стандартами НАТО [10], створенню відповідних програмних систем на основі використання методу аналізу ієрархій для вибору кращого з альтернативних варіантів [8, 11].

Разом з тим, питання розроблення предметно орієнтованої системи підтримки прийняття рішень при оцінюванні технічного рівня автотехніки з використанням методів інженерії знань залишається недостатньо дослідженим, що обумовлює актуальність обраного напрямку досліджень.

Мета статті полягає в обґрунтуванні та дослідженні використання методу аналізу ієрархій Т. Сааті для прийняття управлінських рішень щодо вибору кращої моделі екскаватора на основі оцінки технічного рівня розглянутих моделей екскаваторів за умов суперечливості критеріїв або недостатності (відсутності) інформації про них.

Виклад основного матеріалу. Задача прийняття рішення має місце, коли для досягнення поставленої мети необхідно здійснити вибір оптимального варіанту, засобу дії тощо серед заданої множини альтернатив. Такий вибір пов'язаний із процесом опрацювання інформації про альтернативи, критерії якості, можливі результати, систему переваг і спосіб відображення допустимих альтернатив у множину критеріальних оцінок очікуваних результатів.

За вхідні дані використовували відомості, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики одноковшових екскаваторів

№ з/п	Марка техніки	Глибина котловану, що відривається, м	Технічна продуктивність, $м^3$/год.	Місткість ковша, $м^3$	Максимальний радіус копання, м	Вантажопідйомність гаку, т	Швидкість повороту платформи, об./хв..	Маса екскаватора, т	Максимальна швидкість руху, км/год.
1	ЕОВ-4421МУ	4,1	114	0,6	7,4	9	11-13	23,5	80
2	ЕОВ-4421	3,25	100	0,65	7,3	9	5	20	70
3	ЕО-650А	4	90	0,65	7,1	-	9	20,5	80
4	ЕОВ-3521	4	135	0,65	7,1	9	9	16,5	70
5	ЕОВ-3523	5	193	0,8	8,44	-	8	18	90
6	JCB HMEE	3,9	90	0,6	5,25	3,9	-	16,2	88,5

Вибір максимального технічного рівня робився на основі опрацювання інформації про альтернативи (це моделі екскаваторів – Е1, Е2, Е3, Е4, Е5, Е6) та експертної оцінки важливості критеріїв (К1, …, К8).

Згідно з методом аналізу ієрархій, як і в роботах [2, 3, 5, 7], будувалася ієрархія критеріїв і застосовувалися попарні порівняння альтернативних варіантів за різними критеріями, а також виконувалося подальше ранжування набору альтернатив за всіма критеріями.

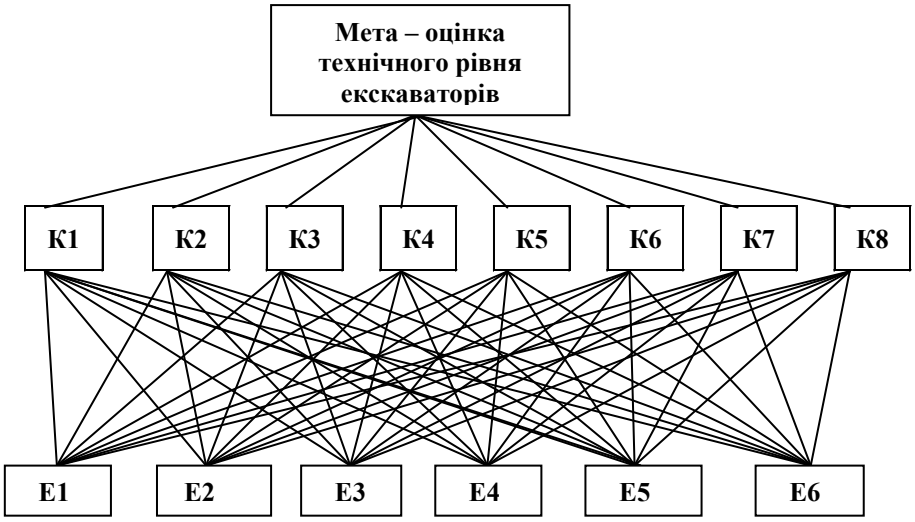


Рис. 1. Ієрархія оцінки технічного рівня екскаваторів

Метод аналізу ієрархій у нашому випадку містить такі етапи:

1. Структурування задачі як трирівневої ієрархічної структури (мета, критерії, альтернативи).

2. Оцінювання альтернативних сценаріїв, тобто оцінка значимості кожного з критеріїв стосовно головної мети. Для цього при їх попарному порівнянні використовували відомості таблиці 2.

Таблиця 2

Шкала відносної важливості

Степінь	Визначення
1	Однакова значимість
3	Незначна перевага значимості одного елементу над іншим
5	Суттєва або сильна перевага одного елементу над іншим
7	Сильна перевага одного елементу над іншим
9	Абсолютна перевага одного елементу над іншим
2, 4, 6, 8	Проміжні значення між сусідніми

Для згладження похибок методу при обчисленні середніх геометричних пропонуємо відсутні в таблиці 1 елементи порівняльних характеристик (критеріїв) екскаваторів замінити з урахуванням шкали відносної важливості (таблиця 2) на «1», внаслідок чого одержимо таблицю 3 для встановлення парних порівнянь альтернатив за критеріями:

Таблиця 3

№ з/п	Модель техніки	Глибина котловану, що відривається, м	Технічна продуктивність, м³/год.	Місткість ковша, м³	Максимальний радіус копання, м	Вантажопідйомність гаку, т	Швидкість повороту платформи, об./хв..	Маса екскаватора, т	Максимальна швидкість руху, км/год.
1	ЕОВ-4421МУ	4,1	114	0,6	7,4	9	9	23,5	80
2	ЕОВ-4421	3,25	100	0,65	7,3	9	3,75	20	70
3	ЕО-650А	4	90	0,65	7,1	**1**	6,75	20,5	80
4	ЕОВ-3521	4	135	0,65	7,1	9	6,75	16,5	70
5	ЕОВ-3523	5	193	0,8	8,44	**1**	6	18	90
6	JCB HMEE	3,9	90	0,6	5,25	3,9	**1**	16,2	88,5

На основі аналізу важливостей розглянутих критеріїв стосовно мети була зроблена експертна оцінка їх важливості, результати якої (в балах) наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Важливість параметрів задачі (критеріїв)

Критерії / Позначення	Глибина котловану, що відривається, м	Технічна продуктивність, м³/год.	Місткість ковша, м³	Максимальний радіус копання, м	Вантажопідйомність гаку, т	Швидкість повороту платформи, об./хв..	Маса екскаватора, т	Максимальна швидкість руху, км/год.
К	**К1**	**К2**	**К3**	**К4**	**К5**	**К6**	**К7**	**К8**
Бал	**3**	**9**	**5**	**4**	**5**	**7**	**5**	**8**

З використанням даних таблиці 4 були проведені попарні оцінювання значимості критеріїв (матриця ***A***) [7, с.95]. Результати таких порівнянь наведені в табл. 5.

Зауваження: при заповненні таблиці 5 «Оцінка значимості критеріїв» для критерію К7, з метою усунення протиріччя з рештою критеріїв, бралися обернені величини, тобто моделі з меншою масою мали більші значення відношення порівняння [4, с. 14]. Очевидно, що кращою вважалася модель із меншою масою.

Таблиця 5

Оцінка значимості критеріїв

К	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	Степінь 1/8 від добутку рядкових елементів	Нормований вектор пріоритетів
К1	1	0,333333	0,6	0,75	0,6	0,428571	0,6	0,375	0,552467	0,065217
К2	3	1,0000	1,8	2,25	1,8	1,285714	1,8	1,125	1,6574	0,195652
К3	1,666667	0,555556	1	1,25	1	0,714286	1	0,625	0,920778	0,108696
К4	1,333333	0,444444	0,8	1	0,8	0,571429	0,8	0,5	0,736622	0,086957
К5	1,666667	0,555556	1	1,25	1	0,714286	1	0,625	0,920778	0,108696
К6	2,333333	0,777778	1,4	1,75	1,4	1	1,4	0,875	1,289089	0,152174
К7	1,666667	0,555556	1	1,25	1	0,714286	1	0,625	0,920778	0,108696
К8	2,666667	0,888889	1,6	2	1,6	1,142857	1,6	1	1,473244	0,173913
Сума	15,33333	5,111111	9,2	11,5	9,2	6,571429	9,2	5,75	8,471155	1

Узгодженість I_y експертної оцінки критеріїв визначали наступним чином:

$\lambda_{мах} = 15{,}333 \cdot 0{,}065 + 5{,}11 \cdot 0{,}196 + 9{,}2 \cdot 0{,}109 + 11{,}5 \cdot 0{,}087 + 9{,}2 \cdot 0{,}107 + 6{,}57 \cdot 0{,}152 + 9{,}2 \cdot 0{,}109 + 5{,}75 \cdot 0{,}174 = 7{,}986.$ $I_y = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)$ = -0,0143. Тоді, згідно таблиці 6, $B_y = \frac{I_y}{I_e} = \frac{-0{,}0143}{1{,}41} = -0{,}0101,$

або – 1,01%, тобто узгодженість є в допустимих межах (менша 10%).

Порівняння альтернатив (Е) відносно критеріїв (К) даної ієрархії, тобто за кожним із восьми

критеріїв К1, К2, …, К8.

На цьому етапі, з використанням матриць попарних порівнянь, одержали їх нормовані вектори локальних пріоритетів альтернатив, які наведені в таблиці 7.

Таблиця 6

Значення випадкового індексу узгодженості за Т. Сааті

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ie	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Таблиця 7

Оцінка значимості альтернатив за критеріями

К1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Степінь 1/6	Нормований вектор
E1	1	1,2615	1,025	1,025	0,82	1,0513	1,022504	0,169074
E2	0,7927	1	0,8125	0,8125	0,65	0,8333	0,810145	0,13396
E4	0,9756	1,2308	1	1	0,8	1,0256	0,997514	0,164942
E5	1,2195	1,5385	1,25	1,25	1	1,282	1,247449	0,206269
E6	0,9513	1,2	0,975	0,975	0,78	1	0,972545	0,160813
Сума	5,9147	7,4616	6,0625	6,0625	4,85	6,2178	6,047671	1

К2	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Степінь 1/6	Нормований вектор
E1	1	1,14	1,2627	0,8444	0,5907	1,2627	0,98376	0,157705
E2	0,8772	1	1,1111	0,7407	0,5181	1,1111	0,863607	0,138444
E3	0,792	0,9	1	0,6667	0,4663	1	0,777516	0,124642
E4	1,1842	1,35	1,4999	1	0,6995	1,5	1,166586	0,187014
E5	1,6929	1,9301	2,1445	1,4296	1	2,1444	1,668989	0,267553
E6	0,792	0,9	1	0,6667	0,4663	1	0,777516	0,124642
Сума	6,3383	7,2201	8,0182	5,3481	3,7409	8,0182	6,237975	1

.....

К8	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Степінь 1/6	Нормований вектор
E1	1	1,1429	1	1,1429	0,8889	0,9039	1,008085	0,167189
E2	0,875	1	0,875	1	0,7778	0,7910	0,882051	0,146287
E3	1	1,1429	1	1,1429	0,8889	0,9040	1,008085	0,167189
E4	0,875	1	0,875	1	0,7778	0,7910	0,882051	0,146287
E5	1,125	1,2857	1,125	1,2857	1	1,0170	1,134122	0,188092
E6	1,1062	1,2643	1,1062	1,2643	0,9833	1	1,115216	0,184957
Сума	5,9812	6,8357	5,9812	6,8357	5,3167	5,4068	6,029609	1

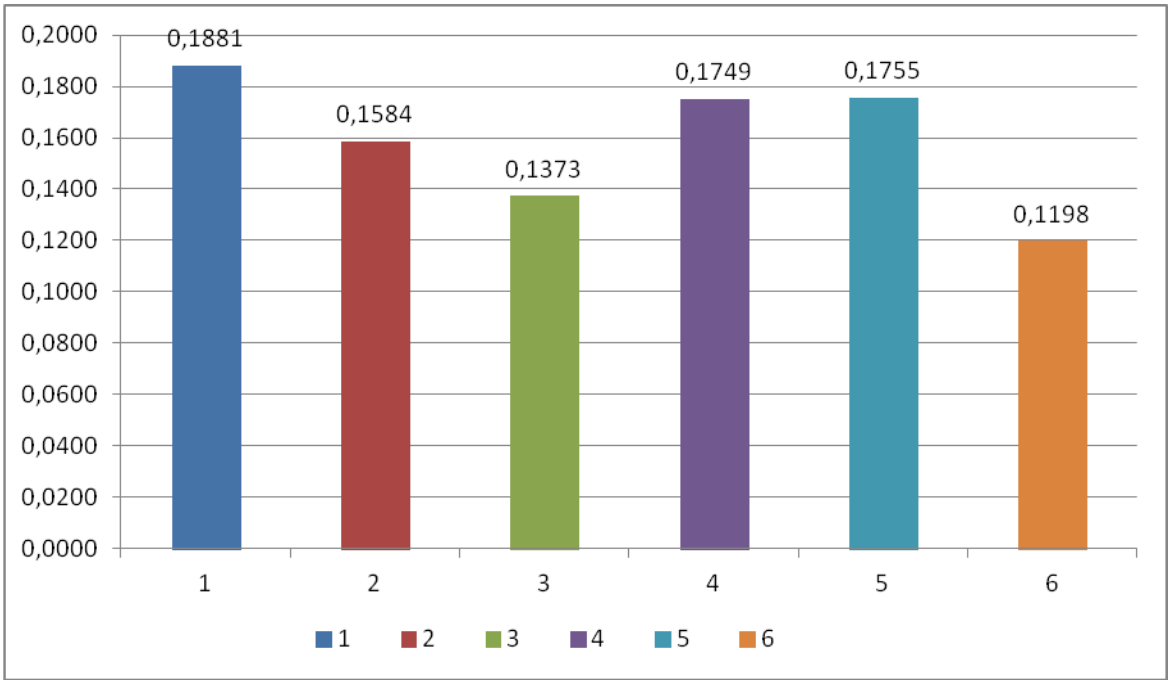
Перевірено, що для всіх нормованих векторів з таблиці 7 показники відношення узгодженості знаходяться в допустимих межах.

На основі даних таблиці 7 були розраховані компоненти глобального вектора пріоритетів як добуток матриці, сформованої з нормованих векторів локальних пріоритетів альтернатив, і вектора-стовпця локальних пріоритетів критеріїв (таблиця 5):

$$\begin{pmatrix} 0,1691 & 0,1577 & 0,1518 & 0,1739 & 0,2735 & 0,2707 & 0,0519 & 0,1672 \\ 0,1340 & 0,1384 & 0,1645 & 0,1716 & 0,2735 & 0,1128 & 0,1610 & 0,1463 \\ 0,1649 & 0,1246 & 0,1726 & 0,1668 & 0,0304 & 0,2030 & 0,0595 & 0,1672 \\ 0,1649 & 0,1870 & 0,1567 & 0,1668 & 0,2736 & 0,2030 & 0,0740 & 0,1463 \\ 0,2013 & 0,2675 & 0,2025 & 0,1984 & 0,0304 & 0,1804 & 0,6780 & 0,1881 \\ 0,1608 & 0,1246 & 0,1518 & 0,1224 & 0,1185 & 0,0300 & 0,0753 & 0,1850 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,065 \\ 0,1956 \\ 0,1087 \\ 0,087 \\ 0,1087 \\ 0,1522 \\ 0,1087 \\ 0,1739 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1881 \\ 0,1584 \\ 0,1373 \\ 0,1749 \\ 0,1755 \\ 0,1198 \end{pmatrix}$$

Альтернатива, якій відповідає максимальна компонента глобального вектора пріоритетів, вважається найкращим вибором – розв'язком багатокритеріальної оптимізаційної задачі.

На діаграмі нижче показані рейтинги розглянутих моделей екскаваторів щодо їх технічного рівня.



Висновки

Найвищий технічний рівень (глобальний пріоритет дорівнює 0,1881) має модель ЕОВ-4421МУ. Найближчою до неї є ЕОВ-3523, показник якої на 6,7 % нижчий. Модель ЕОВ-3521 – на третьому місці з показником на 7% меншим порівняно з першою моделлю. ЕОВ-4421 – на четвертому місці: вона відстає порівняно з першою моделлю на 15,8 %. ЕО-650А – п'ята, різниця в показниках технічного рівня складає 27 %. Нарешті, останнє місце належить моделі JCB HMEE, яка відстає за своїм технічним рівнем порівняно з моделлю ЕОВ-4421МУ на 36 %.

Таким чином, використання методу аналізу ієрархій дозволило оцінити технічний рівень розглянутих моделей екскаваторів і вказати моделі з кращим технічним рівнем.

Метод Сааті є ефективним інструментом оцінювання технічних систем і дозволяє особі, що робить вибір, приймати обґрунтовані рішення. Його використання дозволяє зменшити суб'єктивність при формуванні мети функціонування системи. Перспективним доповненням результатів оцінювання технічного рівня можуть стати дослідження залежності між критеріями на основі їх кореляційного та факторного аналізу.

Література

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; [пер. с англ. Р. Вачнадзе]. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.

2. Кулиняк І.Я. Метод аналізу ієрархій як інструмент оцінювання рівня інноваційної активності регіонів Західної України / І.Я. Кулиняк, Г.Р. Копець // Вісник НУЛП: Проблеми економіки та управління. – 2017. – № 873. – С. 60–71.

3. Трунова О.В. Застосування методу Сааті при прийнятті управлінських рішень / О.В. Трунова // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Педагогічні науки. – 2013. – Вип. 108.1. – С. 34–40.

4. Тимохін В.М. Застосування методу Сааті в задачах економічного оцінювання / В.М. Тимохін, А.Г. Подольська // Економіка і організація управління. – 2013. – № 1–2. – С. 13–21.

5. Манталюк О.В. Застосування методу аналізу ієрархій до задачі прийняття економічних рішень в умовах невизначеності / О.В. Манталюк // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2014. – № 4. – Т. 2. – С. 276–279.

6. Маргасов Д.В. Розробка моделі та модифікація методу аналізу ієрархій для оцінки рівня енергоефективності / Д.В. Маргасов, Е.Ю. Сахно, І.С. Скітер // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 5(2). – С. 26–32.

7. Ткачова О.К. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень / О.К. Ткачова // Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво. – 2015. – № 4. – С. 92–96.

8. Щурова З. С. Автоматизація багатокритеріального вибору потенційного постачальника / З. С. Щурова, О. Л. Жиров // Економічний вісник НТУУ «КПІ». – 2016. – № 13. – С. 568–575.

9. Синенко М.А. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень на прикладі підприємства малого бізнесу / М.А. Синенко // Інтелект XXI. – 2018. – № 1. – С. 235–238.

10. Фролов В.С. Обґрунтування науково-методичних підходів до розроблення організаційної

структури Збройних Сил України за стандартами НАТО / В.С. Фролов // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ імені І. Черняхівського. – 2020. – № 1. – С. 17–25.

11. Trygub R. O. Researching semi structured problems of multicriteria optimization using the software system / R. Trygub, O. Trygub, V. Gorborukov // Наукові записки НУКМА. Комп'ютерні науки. – 2013. – Т. 151. – С. 79–88.

References

1. Saati T. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij / T. Saati ; [per. s angl. R. Vachnadze]. – Moskva : Radio i svyaz, 1993. – 278 s.

2. Kulyniak I.Ia. Metod analizu iierarkhii yak instrument otsiniuvannia rivnia innovatsiinoi aktyvnosti rehioniv Zakhidnoi Ukrainy / I.Ia. Kulyniak, H.R. Kopets // Visnyk NULP: Problemy ekonomiky ta upravlinnia. – 2017. – № 873. – S. 60–71.

3. Trunova O.V. Zastosuvannia metodu Saati pry pryiniatti upravlinskykh rishen / O.V. Trunova // Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Pedahohichni nauky. – 2013. – Vyp. 108.1. – S. 34–40.

4. Tymokhin V.M. Zastosuvannia metodu Saati v zadachakh ekonomichnoho otsiniuvannia / V.M. Tymokhin, A.H. Podolska // Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia. – 2013. – № 1–2. – S. 13–21.

5. Mantaliuk O.V. Zastosuvannia metodu analizu iierarkhii do zadachi pryiniattia ekonomichnykh rishen v umovakh nevyznachenosti / O.V. Mantaliuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ekonomichni nauky. – 2014. – № 4. – T. 2. – S. 276–279.

6. Marhasov D.V. Rozrobka modeli ta modyfikatsiia metodu analizu iierarkhii dlia otsinky rivnia enerhoefektyvnosti / D.V. Marhasov, E.Iu. Sakhno, I.S. Skiter // Vostochno-Evropeiskyi zhurnal peredovыkh tekhnolohyi. – 2015. – № 5(2). – S. 26–32.

7. Tkachova O.K. Metod Saati pry pryiniatti upravlinskykh rishen / O.K. Tkachova // Derzhava ta rehiony. Seriia: Ekonomika ta pidpryiemnytstvo. – 2015. – № 4. – S. 92–96.

8. Shchurova Z. S. Avtomatyzatsiia bahatokryterialnoho vyboru potentsiinoho postachalnyka / Z. S. Shchurova, O. L. Zhyrov // Ekonomichnyi visnyk NTUU «KPI». – 2016. – № 13. – S. 568–575.

9. Synenko M.A. Metod Saati pry pryiniatti upravlinskykh rishen na prykladi pidpryiemstva maloho biznesu / M.A. Synenko // Intelekt KhKhI. – 2018. – № 1. – S. 235–238.

10. Frolov V.S. Obgruntuvannia naukovo-metodychnykh pidkhodiv do rozroblennia orhanizatsiinoi struktury Zbroinykh Syl Ukrainy za standartamy NATO / V.S. Frolov // Zbirnyk naukovykh prats TsVSD NUOU imeni I. Cherniakhivskoho. – 2020. – № 1. – S. 17–25.

11. Trygub R. O. Researching semi structured problems of multicriteria optimization using the software system / R. Trygub, O. Trygub, V. Gorborukov // Naukovi zapysky NUKMA. Kompiuterni nauky. – 2013. – T. 151. – S. 79–88.

Надійшла / Paper received : 22.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-184-188
УДК 621.833.65

О.Р. СТРІЛЕЦЬ
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЗУПИННИКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ У ВИГЛЯДІ ЗАМКНУТОЇ ГІДРОСИСТЕМИ

У статті описана будова і принцип роботи зупинника обертального руху, який містить шестеренчастий гідронасос з всмоктувальним і напірним патрубками, причому на всмоктувальному патрубку поставлений зворотний клапан, а на напірному – регулювальний кран, розміщені в ємності з рідиною, утворюючи замкнуту гідросистему. Гідронасос зупинника обертального руху з'єднаний з валом, що потрібно зупинити. Вал обертається, коли гідронасос перекачує рідину при відкритому регулювальному крані. При закритому регулювальному крані вал зупинений, а у проміжку його кутова швидкість змінюється від максимального значення до нуля. Наведений тепловий розрахунок такої замкнутої гідросистеми. На основі того, що максимальна стала температура рідини має не перевищувати 70°С, можна вибрати об'єм бака, поверхню тепловіддачі чи передбачити в гідросистемі теплообмінний пристрій.

Ключові слова: зупинник обертального руху, замкнута гідросистема, шестеренчастий гідронасос, всмоктувальний і напірний патрубки, тепловий розрахунок.

O. R. STRILETS
National University of Water And Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

THERMAL CALCULATIONS OF THE ROTARY MOTION STOPPER IN THE FORM OF A CLOSED-LOOP HYDRAULIC SYSTEM

The aim of the research is to substantiate the need for cooling a closed-loop hydraulic system based on the balance of the amount of heat generated during operation and dissipated into the environment. An analysis of recent scientific publications shows that scientific works related to the use of volumetric hydraulic drives with gear pumps have little to do with closed-loop hydraulic systems and their thermal processes. These issues are waiting to be resolved. The article describes the structure and principle of operation of a rotary motion stopper, which contains a gear hydraulic pump, with suction and discharge pipes with a suction valve mounted on the suction pipe, and a control valve mounted on the discharge pipe, placed in a container with liquid forming a closed-loop hydrosystem. The hydraulic pump of the rotary motion stopper is connected to the shaft to be stopped. The shaft rotates when the hydraulic pump pumps liquid with the control valve open. When the control valve is closed, the shaft is stopped, and in between its angular velocity varies from the maximum value to zero. The thermal calculation of such a closed-loop hydraulic system has been given. Based on the fact that the maximum constant temperature of the liquid should not exceed 70°C, you can choose the volume of the tank, the heat transfer surface or provide a heat exchanger in the hydraulic system. Depending on the mechanical and geometrical parameters of a closed-loop hydraulic system, computer simulations have been used to calculate the temperature of the fluid moving during the rotation of the gear hydraulic pump and based on it you can select the required tank volume, heat transfer surface or provide a heat exchanger.

Key words: rotary motion stopper, closed-loop hydraulic system, gear hydraulic pump, suction and discharge pipes, thermal calculation.

Постановка проблеми

Гідропривід широко використовують у підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських і гірничих, машинах, на судах, літальних і підводних апаратах, на різному устаткуванні машинобудівних, металургійних, хімічних та інших виробництв. Це обумовлено його істотними перевагами, до яких варто віднести малу масу і габарити, розташування, низьку інерційність, що забезпечує хороші динамічні властивості, безступінчасте регулювання швидкості, зручність керування, можливість розгалуження потужності, застосування стандартизованих і уніфікованих складальних одиниць, можливість здійснення безступінчастої передачі обертального моменту, підвищення ККД машини і її довговічності в цілому та інші переваги.

Під час розробки зупинника вантажу [1, 2] і його удосконалення [3, 4] та застосування у зубчастому диференціалі, наприклад [5], з'явилась можливість розробити пристрій для керування змінами швидкості механічних приводів.

Аналіз останніх джерел

Розглянемо останні дослідження і публікації, присвячені об'ємному гідроприводу з шестеренчастими насосами [6–14].

В [6] описане експериментальне дослідження руху потоку гідравлічної рідини всередині шестеренного насоса, виходячи із його невеликої складності, високої надійності та простого обслуговування у використанні, створенні постійної швидкості потоку рідини і це обчислювальне дослідження рекомендується використовувати в якості методу для вивчення потоку рідини всередині різних об'ємних моделей, що застосовуються в галузі промислового гідравлічного приводу.

В [7] описана методика моделювання HYGESim, зовнішніх шестеренних насосів, що працюють з неньютоновими рідинами, що мають різні характеристики в'язкості, а також описано кілька порівнянь між результатами моделювання та експериментальними даними, отриманими для перевірки представленої методики.

В [8] розглядаються шестеренні гідронасоси еліптичного типу, з метою ефективного зменшення коливання потоку рідини за допомогою приводу змінної кутової швидкості, де аналізується вплив

ексцентричного співвідношення, кількості порядку розміщення та модуля роторів на витрату, потім на основі характеристик потоку насоса подається зовнішній не круговий зубчастий привід і, нарешті, створений прототип насоса, який доводить, що пульсація потоку може бути ефективно зменшена.

В [9] проведено тривимірне числове моделювання зовнішнього шестеренного насоса для вивчення впливу параметрів 3D геометричного проектування на експлуатаційні характеристики насоса такі, як витрата, внутрішнього тиску, локальної кавітації та пульсації тиску подачі. Метод (ISM) був використаний для імітації роботи насоса в екстремальних умовах з високою швидкістю обертання. Виявили, що максимальна витрата шестеренного насоса є функцією зазору наконечника передач і бічного зазору і за допомогою 3D моделі виділяється вплив бічного зазору на швидкість потоку.

В [10] запропоновано систематичну процедуру для визначення змінних навантажень збудження, що виникають внаслідок зміни тиску всередині зубцевих просторів у зовнішніх шестеренних насосах. Пропонується загальна методологія, для визначення сили тиску та компонентів обертального моменту вздовж трьох координатних осей. Навантаження під тиском, оцінені за цією процедурою, порівнюються з іншими методами і показують, що дана методологія здатна описати більш широкий спектр явищ, що беруть участь у визначенні всіх компонентів тиску та обертального моменту.

В [11] розглянуто проблему визначення відносної продуктивності прямозубих та косозубих зовнішніх шестеренних насосів (EGP) для передачі енергії рідиною. Це включає вирішення двох основних завдань роботи, параметризацію загальної конструкції EGP та кількісну оцінку її ефективності. Застосовуючи цю процедуру, генетичний алгоритм може продовжувати вдосконалюватися з покоління в покоління до тих пір, поки не буде визначений оптимальний набір конструкцій як для косо-, так і для прямозубих одиниць.

В [12–14] обґрунтоване використання шестеренчастих гідронасосів у пристроях зміни швидкості за допомогою зубчастих диференціалів з замкнутими гідросистемами, коли ланкою керування є сонячне зубчасте колесо, або епіцикл, або водило.

Із аналізу останніх публікацій видно, що наукові роботи пов’язані з застосуванням об’ємних гідроприводів з шестеренчастими насосами, мало пов’язані з замкнутими гідросистемами і їх тепловими процесами.

Мета роботи

Метою роботи є обґрунтування необхідності охолодження замкнутої гідросистеми на основі балансу кількості тепла, яке утворюється при роботі та яке розсіюється в атмосферу.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 показана схема замкнутої гідросистеми (гідравлічного зупинника) для керування змінами швидкості через зубчастий диференціал [3], яка складається з шестеренчастого гідронасоса 1, трубопроводів 2, регулювального крана 3, зворотного клапана 4 і ємності для рідини 5.

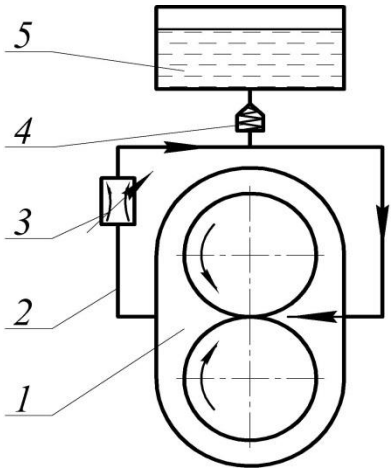


Рис. 1. Схема замкнутої гідросистеми для керування змінами швидкості у зубчастому диференціалі

На рис. 2 показана схема зупинника обертального руху [4], де він містить шестеренчастий гідронасос 1, з всмоктувальним 2 і напірним 3 патрубками. На всмоктувальному 2 патрубку поставлений зворотний клапан 4, а на напірному 3 патрубку встановлений регулювальний кран 5. Рідина 6 розміщена в ємності 7. Шестеренчастий гідронасос 1, з всмоктувальним 2 і напірним 3 патрубками та зворотним клапаном 4 і регулювальним краном 5 розміщені в ємності 7 з рідиною 6.

Замкнута гідросистема в обох випадках працює так. Шестеренчастий гідронасос перекачує рідину в замкнутій гідросистемі, коли регулювальний кран відкритий. Якщо регулювальний кран закритий, шестеренчастий гідронасос зупинений і, при цьому, ланка на якій встановлена замкнута гідросистема зупинена. Цей принцип роботи замкнутої гідросистеми використаний для керування змінами швидкості веденої ланки зубчастого диференціала в залежності від швидкостей ведучої ланки і ланки керування.

Тепловий розрахунок гідросистеми виконують для з'ясування умов роботи гідроприводу, уточнення об'єму масляного бака, а також для визначення необхідності застосування теплообмінників.

Мінімальна температура робочої рідини дорівнює температурі повітря навколишнього середовища. Максимальну температуру знаходять в результаті теплового розрахунку.

Підвищення температури робочої рідини насамперед пов'язано з внутрішнім тертям, особливо при дроселюванні рідини. Всі втрати потужності в гідросистемі в кінцевому рахунку перетворюються в теплоту, що акумулюється в рідині. Про все це наголошується в класичних і сучасних наукових літературних джерелах, наприклад, [15–19] та інших.

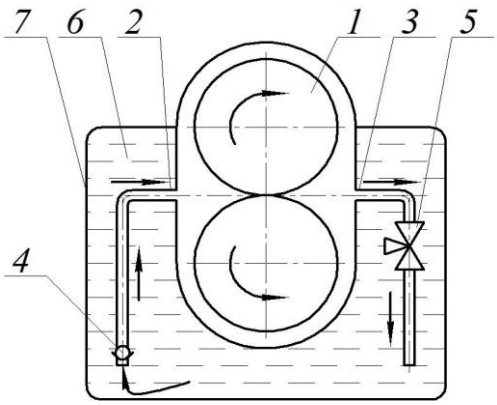


Рис. 2. Гідравлічна схема зупинника

Кількість теплоти Q, одержаної гідросистемою в одиницю часу, відповідає втраченій в гідроприводі потужності і може бути визначена за формулою, кДж:

$$Q = (1-\eta_{заг})P_н K_п, \quad (1)$$

де $\eta_{заг}$ – загальний ККД гідроприводу; $P_н$ – потужність приводу насоса, кВт; $K_п$ – коефіцієнт тривалості роботи під навантаженням. Для орієнтованого розрахунку можна прийняти $K_п = 0{,}75$.

При розрахунку гідросистеми потрібно знайти максимальну температуру рідини, °С, що досягається через одну годину роботи після початку експлуатації гідроприводу:

$$t_{уст} = t_{о.\max} + \frac{Q}{KA}, \quad (2)$$

де $t_{о.\max}$ – максимальна температура навколишнього середовища; K – коефіцієнт тепловіддачі поверхні гідроагрегатів ($K = 0{,}04$ кдж/м^2·с·град); A – сумарна площа тепловипромінюючих поверхонь гідроприводу, м^2:

$$A \approx 0{,}14\sqrt[3]{W^2}, \quad (3)$$

де W – об'єм бака, л.

Підставимо (1) і (3) в (2) отримаємо:

$$t_{уст} = t_{о.\max} + \frac{(1-\eta_{заг})P_н K_п}{0{,}14K\sqrt[3]{W^2}}. \quad (4)$$

Вираз (4) запрограмований на ПК для наступних даних: $t_{о.\max} = 20°C$; $\eta_{заг} = 0{,}88...0{,}91$; $P_н = 0{,}5...10{,}0$ кВт; $W = 1{,}0...10{,}0$ л та отримані графічні залежності для температури рідини, що рухається в замкнутій гідросистемі. На рис. 3 і 4 наведені такі графічні залежності.

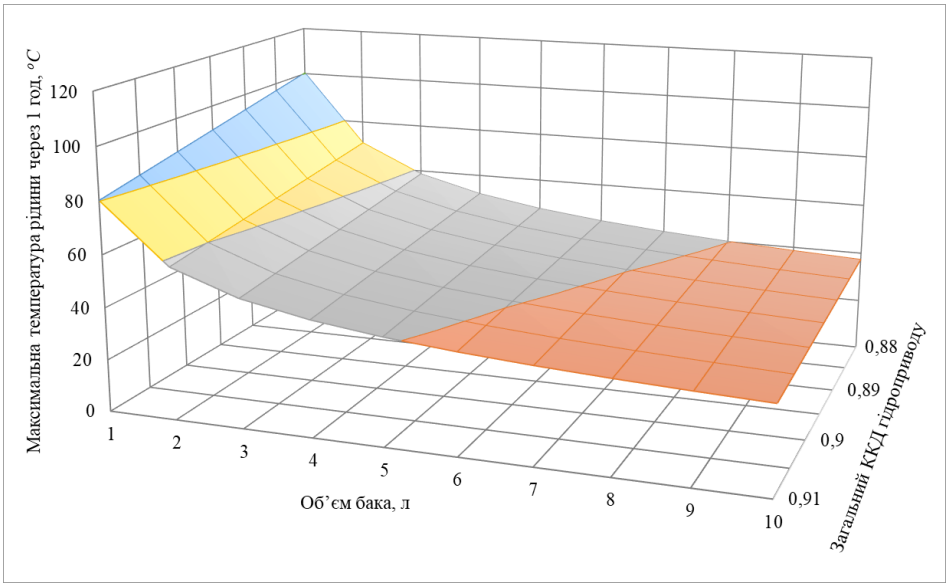


Рис. 3. Графічні залежності температури рідини $t_{\max} = f(w, \eta_{заг})$

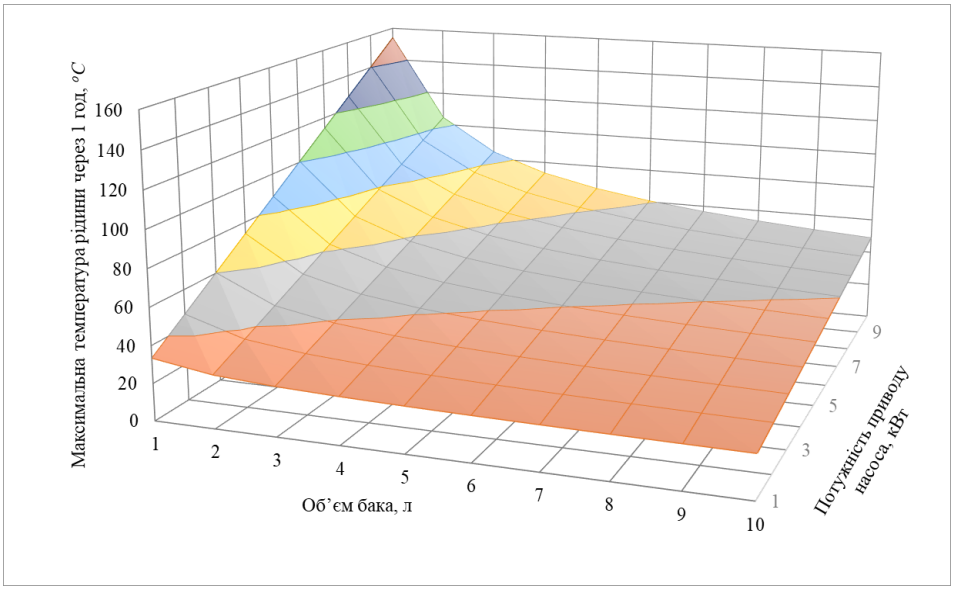


Рис. 4. Графічні залежності температури рідини $t_{\max} = f(w, P)$

Отримані графічні залежності дозволяють визначити максимальну температуру рідини. Керуючись тим, що максимальна стала температура рідини має не перевищувати 70°С, необхідно вибрати об'єм бака, поверхню тепловіддачі чи передбачити в гідросистемі теплообмінний пристрій.

Висновки

Залежно від механічних і геометричних параметрів замкнутої гідросистеми методом комп'ютерного моделювання побудовані графіки для розрахунку температури рідини, що рухається при обертанні шестеренчастого гідронасоса і орієнтуючись на неї можна вибрати необхідний об'єм бака, поверхню тепловіддачі чи передбачити теплообмінний пристрій.

Література

1. Пат. на изобретение № 2211796 Российской Федерации. МПК F 16 D 57/06. Останов для груза перемещаемого механизмом подъема / В.Н. Стрелец, Н.М. Куденко ; заявитель и патентообладатель Украинский государственный университет водного хозяйства и природопользования. – № 2001107699 ; заявл. 21.03.2001 ; опубл. 10.09.03, Бюл. № 25. – 3 с.

2. Пат. на винахід № 44135 України. МПК B 66 D 5/32. Вантажоупорний зупинник / В.М. Стрілець, М.М. Куденко ; заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – u № 2001 053400 ; заявл. 21.05.01 ; опубл. 15.03.05, Бюл. № 3. – 3 с.

3. Пат. на корисну модель № 144997 України. МПК F 66 D 57/06. Зупинник обертального руху / О.Р. Стрілець, В.О. Малащенко, В.М. Стрілець ; заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – u № 2020 03635 ; заявл. 17.06.2020 ; опубл. 10.11.20, Бюл. № 21. – 3 с.

4. Заявка u № 2020 06424 на пат. на корисну модель України. МПК F 66 D 57/06. Зупинник обертального руху / О.Р. Стрілець, В.О. Малащенко, В.М. Стрілець ; заявник Національний університет водного господарства та природокористування. – заявл. 05.10.2020. – 3 с.

5. Пат. на корисну модель № 28489 України. МПК B 60 K 17/06. Планетарна коробка передач / О.Р. Стрілець ; заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – u № 2007 09132 ; заявл. 09.08.07 ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20. – 3 с.

6. Scheaua Fănel. The Use Of Numerical Analysis In Order To Highlight The Fluid Dynamics Inside A Hydraulic Gear Pump Model / Scheaua Fănel // Journal of Industrial Design and Engineering Graphics. – 2015. – Vol. 10 (3). – P. 33–36.

7. Rituraj F. External gear pumps operating with non-Newtonian fluids: Modelling and experimental validation / F. Rituraj, A. Vacca // Mech. Syst. Signal Process. – 2018. – Vol. 106. – P. 284–302.

8. Dawei L. Flow fluctuation abatement of high-order elliptical gear pump by external noncircular gear drive / Liu Dawei, Ba Yanbo, Ren Tingzhi // Mechanism Theory. – 2019. – Vol. 134. – P. 338–348.

9. Yonghan Y. Numerical simulation of three-dimensional external gear pump using immersed solid method / Yoon Yonghan, Park Byung-Ho, Shim Jaesool, Han Yong-Oun, Hong Byeong-Joo, Yun Song-Hyun // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 118 – P. 539–550.

10. Battarra M. A method for variable pressure load estimation in spur and helical gear pumps / M. Battarra, E. Mucchi // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 76–77. – P. 265–282.

11. Ransegnola T. A comparison of helical and spur external gear machines for fluid power applications: Design and optimization / T. Ransegnola, X. Zhao, A. Vacca // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – Vol.

142, P. 103–106.

12. Стрілець О.Р. Керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі через епіцикл / О.Р. Стрілець // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – № 4(80). – С. 129–135.

13. Стрілець О.Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через сонячне зубчасте колесо / О.Р. Стрілець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – № 5(229). – С. 68–72.

14. Стрілець О.Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через водило / О. Р. Стрілець // Вісник Кременчуцького національного університету. – Кременчук : Кр.НУ, 2015. – Вип. 6(95). – С. 72–77.

15. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов, О.В. Байбаков, Ю.Л. Кириловский. – 2-е изд, перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

16. Богданович Л.Б. Гидравлические приводы / Л.Б. Богданович. – К. : Вища шк., 1980. – 232 с.

17. Вильнер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и приводам / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов. – Минск : Вышейша школа, 1976. – 416 с.

18. Юшкин В.В. Основы расчета объемного гидропривода / В.В. Юшкин. – Минск : Выш. шк., 1982. – 93 с.

19. Мещишена Л.Г. Об'ємний гідропривід : методичні вказівки / Л.Г. Мещишена, Н.В. Ковальчук, Т.В. Руденко. – Кіровоград : КНТУ, 2010. – 68 с.

References

1. Pat. na izobretenie № 2211796 Rossijskoj Federacii. MPK F 16 D 57/06. Ostanov dlya gruza peremeshaemogo mehanizmom podema / V.N. Strelec, N.M. Kudenko ; zayavitel i patentoobladatel Ukrainskij gosudarstvennyj universitet vodnogo hozyajstva i prirodopolzovaniya. – № 2001107699 ; zayavl. 21.03.2001 ; opubl. 10.09.03, Byul. № 25. – 3 s.

2. Pat. na vynakhid № 44135 Ukrainy. MPK V 66 D 5/32. Vantazhoupornyi zupynnyk / V.M. Strilets, M.M. Kudenko ; zaiavnyk i patentovlasnyk Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – u № 2001 053400 ; zaiavl. 21.05.01 ; opubl. 15.03.05, Biul. № 3. – 3 s.

3. Pat. na korysnu model № 144997 Ukrainy. MPK F 66 D 57/06. Zupynnyk obertalnoho rukhu / O.R. Strilets, V.O. Malashchenko, V.M. Strilets ; zaiavnyk i patentovlasnyk Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – u № 2020 03635 ; zaiavl. 17.06.2020 ; opubl. 10.11.20, Biul. № 21. – 3 s.

4. Zaiavka u № 2020 06424 na pat. na korysnu model Ukrainy. MPK F 66 D 57/06. Zupynnyk obertalnoho rukhu / O.R. Strilets, V.O. Malashchenko, V.M. Strilets ; zaiavnyk Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – zaiavl. 05.10.2020. – 3 s.

5. Pat. na korysnu model № 28489 Ukrainy. MPK V 60 K 17/06. Planetarna korobka peredach / O.R. Strilets ; zaiavnyk i patentovlasnyk Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – u № 2007 09132 ; zaiavl. 09.08.07 ; opubl. 10.12.07, Biul. № 20. – 3 s.

6. Scheaua Fănel. The Use Of Numerical Analysis In Order To Highlight The Fluid Dynamics Inside A Hydraulic Gear Pump Model / Scheaua Fănel // Journal of Industrial Design and Engineering Graphics. – 2015. – Vol. 10 (3). – P. 33–36.

7. Rituraj F. External gear pumps operating with non-Newtonian fluids: Modelling and experimental validation / F. Rituraj, A. Vacca // Mech. Syst. Signal Process. – 2018. – Vol. 106. – P. 284–302.

8. Dawei L. Flow fluctuation abatement of high-order elliptical gear pump by external noncircular gear drive / Liu Dawei, Ba Yanbo, Ren Tingzhi // Mechanism Theory. – 2019. – Vol. 134. – P. 338–348.

9. Yonghan Y. Numerical simulation of three-dimensional external gear pump using immersed solid method / Yoon Yonghan, Park Byung-Ho, Shim Jaesool, Han Yong-Oun, Hong Byeong-Joo, Yun Song-Hyun // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 118 – P. 539–550.

10. Battarra M. A method for variable pressure load estimation in spur and helical gear pumps / M. Battarra, E. Mucchi // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 76–77. – P. 265–282.

11. Ransegnola T. A comparison of helical and spur external gear machines for fluid power applications: Design and optimization / T. Ransegnola, X. Zhao, A. Vacca // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – Vol. 142, P. 103–106.

12. Strilets O.R. Keruvannia zminamy shvydkosti za dopomohoiu dyferentsialnoi peredachi cherez epitsykl / O.R. Strilets // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – Ternopil : TNTU, 2015. – № 4(80). – S. 129–135.

13. Strilets O.R. Keruvannia protsesom zminy shvydkosti za dopomohoiu dyferentsialnoi peredachi cherez soniachne zubchaste koleso / O.R. Strilets // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi : KhNU, 2015. – № 5(229). – S. 68–72.

14. Strilets O.R. Keruvannia protsesom zminy shvydkosti za dopomohoiu dyferentsialnoi peredachi cherez vodylo / O. R. Strilets // Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu. – Kremenchuk : Kr.NU, 2015. – Vyp. 6(95). – S. 72–77.

15. Bashta T.M. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: Uchebnik dlya mashinostroitelnyh vuzov / T.M. Bashta, S.S. Rudnev, B.B. Nekrasov, O.V. Bajbakov, Yu.L. Kirilovskij. – 2-e izd, pererab. – M. : Mashinostroenie, 1982. – 423 s.

16. Bogdanovich L.B. Gidravlicheskie privody / L.B. Bogdanovich. – K. : Visha shk., 1980. – 232 s.

17. Vilner Ya.M. Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i privodam / Ya.M. Vilner, Ya.T. Kovalev, B.B. Nekrasov. – Minsk : Vyshejsha shkola, 1976. – 416 s.

18. Yushkin V.V. Osnovy rascheta obemnogo gidroprivoda / V.V. Yushkin. – Minsk : Vysh. shk., 1982. – 93 s.

19. Meshchyshena L.H. Obiemnyi hidropryvid : metodychni vkazivky / L.H. Meshchyshena, N.V. Kovalchuk, T.V. Rudenko. – Kirovohrad : KNTU, 2010. – 68 s.

Надійшла / Paper received : 16.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-189-196
УДК 621.317.3

О.Є. РУБАНЕНКО, А.А. ВИДМИШ
Вінницький національний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ 0,4 КВ

Анотація В статті проаналізовані особливості експлуатації електричних двигунів (ЕД) на підприємствах агропереробних підприємствах України. Звертається увага на те, що біля 95 % електричних двигунів цих підприємств складають трифазні та однофазні асинхронні двигуни з коротко замкнутим ротором на клас напруги 380/220В. ЕД експлуатуються в складних умовах підвищеної вологості, запиленості, перепадів температур, частих пусків, перевантажень і т. п. Прикладами є експлуатація ЕД на пунктах первинної обробки зерна, на тваринницьких фермах і комплексах, під час виробництва цукру та етанолу.

Це створює передумови передчасного пошкодження ЕД. В умовах широкої автоматизації технологічних процесів впроваджуються системи online моніторингу технічного стану (ТС) ЕД. Це сучасні мікропроцесорні системи. Їх програмне забезпечення реалізує складні та інформативні алгоритми визначення поточного стану ЕД на основі аналізу поточних значень діагностичних параметрів.

Однак, поточні значення не всіх діагностичних параметрів ЕД відомі на момент визначення ТС. Тому застосовуються їх прогнозні значення.

Авторами запропоновано оцінювати поточний ТС ЕД аналізуючи значення коефіцієнта його залишкового ресурсу. Значення цих коефіцієнтів змінюються від 1в.о. (двигун справний) до 0в.о. (двигун несправний). На прикладі, показано застосування програмного забезпечення, а саме, Anfis редактор додатку Fuzzy Logic Tool Box пакету прикладних програм Matlab для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД. Зазначається, що похибка навчання моделі, яка ґрунтується на 582 розглянутих варіантах сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значеннях залишкового ресурсу ЕД, не перевищує 0,00288 в.о. (0,2%), а на тестовій виборці (4,1%).

Ключові слова: електричний двигун, технічний стан, діагностування, пошкодження, статор, ротор, нейро-нечітке моделювання, коефіцієнт залишкового ресурсу, функція належності.

O.E. RUBANENKO, A.A. VIDMISH
Vinnytsia National Agrarian University

INVESTIGATION OF DAMAGE TO 0.4 KV ASYNCHRONOUS MOTORS

Abstract The article analyzes the features of operation of electric motors (ED) at the enterprises of agro-processing enterprises of Ukraine. Attention is drawn to the fact that about 95% of electric motors of these enterprises are three-phase and single-phase asynchronous motors with a short-circuited rotor for voltage class 380 / 220V. ED are operated in difficult conditions of high humidity, dust, temperature changes, frequent starts, overloads, etc. Examples are the operation of ED at primary grain processing points, on livestock farms and complexes, during the production of sugar and ethanol.

This creates the preconditions for premature ED damage. In the conditions of wide automation of technological processes systems of online monitoring of a technical condition (TS) ED are introduced. These are modern microprocessor systems. Their software implements complex and informative algorithms for determining the current state of ED based on the analysis of current values of diagnostic parameters.

However, the current values of not all diagnostic parameters of ED are known at the time of determination of the vehicle. Therefore, their predictive values are used.

The authors propose to evaluate the current vehicle ED by analyzing the value of the coefficient of its residual resource. The values of these coefficients vary from 1v.o. (engine working) up to 0v.o. (engine defective). The example shows the application of the software, namely, Anfis editor of the Fuzzy Logic Tool Box application of the Matlab application package to create a mathematical model of the residual resource factor ED. It is noted that the learning error of the model, which is based on 582 considered variants of combinations of diagnostic parameters and the corresponding values of the residual resource of the ED, does not exceed 0.00288 USD. (0.2%), and in the test sample (4.1%).

Key words: electric motor, technical condition, diagnostics, damage, stator, rotor, neuro-fuzzy modeling, residual life factor, membership function.

Постановка проблеми. Агропромисловий комплекс (АПК) є вагомою складовою частиною економіки України. Серед інших задач цей комплекс займається виробництвом та переробкою сільськогосподарської продукції рис. 1 [1].

На рис.1 показані: а), б) – обладнання м'ясокомбінату; в), г) – елеватора, д), ж), к) – комплексу для сушіння зерна; л) – молоко заводу.

Як зазначено в [1] «на сьогодні агропромисловий комплекс (АПК) є однією із найбільш важливих та стійких за стабільністю надходжень до бюджету складових національної економіки України».

АПК є цілісною виробничо-економічною системою, об'єднуючи в собі низку сільськогосподарських підприємств спрямованих на отримання, транспортування, зберігання, переробку та реалізацію сільськогосподарської продукції [1].

а) б) в) г) д) ж) к л

Рис. 1. Обладнання підприємств, що обробляють сільськогосподарську продукцію

Україна є не лише виробником та повчальником сільськогосподарської сировини, а і сучасної високо технологічної продукції підприємств АПК. Рисою цих підприємств є постійне технічне переозброєння, яке полягає у заміні застарілого, малоефективного обладнання на більш якісне і надійне, що відповідає сучасним вимогам. Це дозволяє покращити надійність та якість виробництва, зменшити собівартість продукції.

З метою автоматизації виробництва на таких підприємствах, широко застосовуються електродвигуни (ЕД) різної потужності, наприклад, асинхронні ЕД напругою 380 В з коротко замкнутим ротором. Таких ЕД понад 95%.

Нажаль їх експлуатаційна надійність ще залишається недостатньою. Проте на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу держави суттєвою перешкодою для забезпечення належного рівня конкурентоспроможності підприємств та виробленої ними продукції на зовнішньому ринку є високий рівень витрат електричної енергії на виробництво сільськогосподарської продукції [1]. Тому все більше уваги приділяється альтернативним джерелам електроенергії: сонячним електростанціям, малим гідроелектростанціям, вітровим електростанціям [2, 3]. Також мають місце втрати сировини під час переробки сільськогосподарської продукції, викликані пошкодженням обладнання [4]. До такого обладнання можна віднести і електричні двигуни (ЕД).

Часто електродвигуни використовуються на механізованих виробничих ділянках таких, як: пункти первинної обробки зерна, на тваринницьких фермах і комплексах, під час виробництва цукру та етанолу і т.п.

Відмови електродвигунів [8] викликають порушення технологічних процесів, що завдає відчутної шкоди народному господарству через недовироблення, псування та погіршення якості продукції. Також, порушення технологічного циклу на агропереробному підприємстві викликає зменшення виготовленої продукції, нераціональне використання енергетичних ресурсів і т.п.

Рис.2. Наслідки порушення технології на птахофабриці

Крім того, на відновлення електродвигунів витрачається велика кількість матеріалів (обмотувального проводу, електротехнічної сталі, ізоляційного матеріалу), електроенергії та робочого часу.

Аналіз причин відмов електродвигунів свідчить про те, що, незважаючи на важкі умови роботи в сільському господарстві, переважну більшість з них можна було зберегти: при якісному діагностуванні; при вчасному виведенні в ремонт; за умови поблажливих умов експлуатації ЕД, що мають дефекти на ранній стадії розвитку; за рахунок впровадження on-line систем визначення поточного стану ЕД; при фіксації дефектів на ранній стадії їх розвитку. Також, сучасні методи та засоби діагностування [11] дозволяють обгрунтовано замінити, або вивести в ремонт ЕД, з врахуванням вимог та можливостей технологічного процесу на агропереробному підприємстві.

Враховуючи велику кількість взаємно впливових діагностичних параметрів ЕД, з метою спрощення оцінювання поточного технічного стану пропонуємо використовувати інтегральний діагностичний параметр – коефіцієнт залишкового ресурсу.

Водночас, складно визначати технічний стан працюючого ЕД, адже деякі діагностичні параметри можна вимірювати у відключеного або розібраного ЕД (наприклад, вимірювання опору ізоляції обмотки статора мегаомметром або вимірювання діаметра валу ротора під підшипником з метою виявлення причини вібрації) [5−7]. Тому визначений в темпі процесу, за таких умов, технічний стан працюючого ЕД є прогнозованим – нечітким. Для його визначення варто використовувати методи та засобі нейро-нечіткого моделювання.

Тому проблема підвищення якості експлуатації електродвигунів на агропромисловому виробництві шляхом покращення якості їх діагностування **актуальна** і має велике народногосподарське значення.

Мета досліджень полягає у підвищені якості визначення поточного технічного стану в умовах не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів електричних двигунів на їх технічний стан і в якомога точнішому прогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень ЕД.

Під час досліджень розв'язувались наступні **задачі**:

– аналіз факторів що викликають пошкодження ЕД на підприємствах АПК;

– причини виведення ЕД з експлуатації;

– формування та обробка статистичних даних про пошкодження ЕД на підприємствах агропереробної галузі;

– розробка методу визначення технічного стану ЕД в умовах неповноти початкових даних.

Аналіз досліджень та публікацій. Пошкоджуваність ЕД.

Пошкоджуваність досліджуваних ЕД зумовлена такими особливостями їх експлуатації, як: помилки в виборі ЕД на стадії проектування або під час експлуатації (після заміни ЕД, після перемотування обмотки та зменшення коефіцієнта корисної дії), низький рівень обслуговування та ремонтів (викликаний недостатньою кількістю та кваліфікацією персоналу, відсутністю сучасного ремонтного обладнання), несприятливі умови оточуючого середовища (занадто висока, або низька температура, висока вологість, великі коливання температури і т.п.), тяжкі режими експлуатації (механічні перевантаження, нерівномірний графік навантаження, часті пуски), понад нормовані показники якості електроенергії (перенапруги, надструми, низькі напруги, несинусоїдність, несиметрія), низька надійність внутрішньогосподарських та розподільчих сільських електромереж [5−10].

Пил на млинах (рис. 3), на елеваторах, пунктах первинної переробки зерна, в комбікормових цехах, велика вологість і присутність агресивних газів в тваринницьких приміщеннях, різкі коливання і значне зниження температури в зимовий час на відкритій території, висока температура в котельних і зерносушилках і т.п. погіршують якість мастил у підшипниках (призводить до пошкодження підшипників (рис.4) та до зростання вібрації валу ротора, корпусу ЕД та до зростання середнього квадратичного значення віброшвидкості v_{rms}), якість лакової ізоляції обмоток, поліхлорвінілової ізоляції проводів живлення,

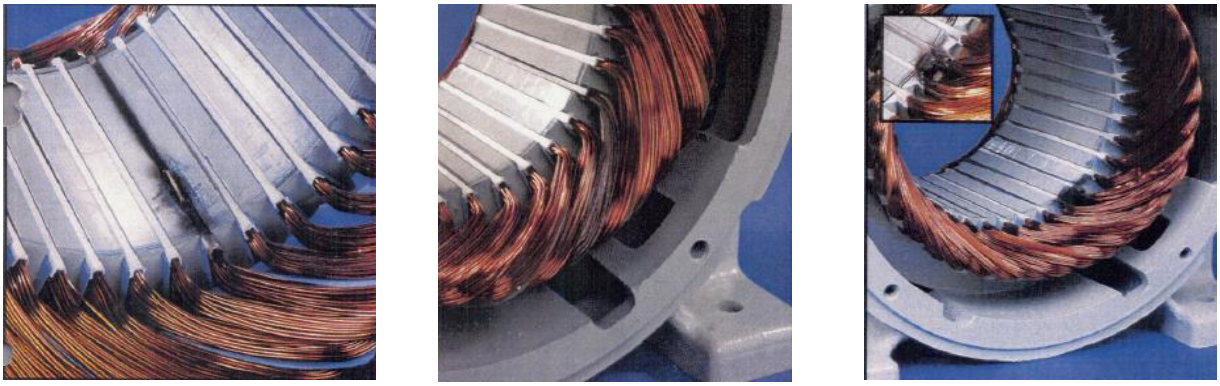
викликає окислення контактів брно (зростає перехідний опір контактів) і т.п. Брно – блок розключення початків («начал» – рос.) обмоток [6−8].

Рис. 3. Пил на електродвигуні мукомольного підприємства

а) б) в)

Рис.4. Пошкодження деталей підшипників.

На рис. 4 показані: а) – зигзагоподібні пошкодження кільця кулькопідшипника внаслідок проходження по ньому електричного струму (ймовірно така картина ушкодження виникла тому, що через підшипник проходив великий електричний струм, і одночасно підшипник піддавався осьовим коливанням); б) – пошкодження сепаратора); в) – забруднений підшипник.



а) б) в)

Рис. 5. Пошкодження ізоляції обмотки статора ЕД: а) – коротке замикання проводів однієї обмотки в пазу статора; б) – прогорання ізоляції проводів однієї обмотки; в) – коротке замикання проводів однієї обмотки з кромкою пазу статора

а) б) в)

Рис. 6. Інші пошкодження ЕД: а) – пошкодження контактів брно; б) – пошкодження ротора; в) – пошкодження крильчатки.

Причини виведення ЕД з експлуатації. Неприпустима концентрація аміаку, сірководню, вуглекислого газу в тваринницьких приміщеннях руйнують ізоляцію обмоток.

За таких умов зменшується активний опір ізоляції обмотки статора (R), зростає температура лобових поверхонь обмотки статора t_1 та температура корпусу ЕД t_2, зростає струм I, що протікає через обмотку статора ЕД. Пошкодження охолодження ЕД також призводить до зростання температури корпусу ЕД t_2. Пошкодження сталі статора викликає зростання струму статора в режимі холостого ходу ЕД – I_{xx} та зростання потужності холостого ходу ЕД – P_{xx}, до нагріву корпусу ЕД (t_2).

Під час проведення дослідного обстеження та планово-попереджувальних ремонтів електричних двигунів на семи підприємствах АПК було виявлено від 18 до 29 одиниць ЕД на кожному, що мають дефекти, які можуть привести до відмови під час роботи.

Часто це пошкодження підшипників, ізоляції обмотки статора та ротора [11, 12]. З 172 одиниць **вибірково** обстежених ЕД виявлені дефекти розподілились так, як це показано в таблиці 1 та на рис.7. Для обстеження вибирались лише ті двигуни, справний технічний стан яких, викликав сумніви у експлуатуючого персоналу за зовнішніми ознаками. До таких ознак відносяться: шум, вібрація, нагрів, тривалий час пуску, занижена швидкість обертів валу ротора і т.п.

Таблиця 1

Виявленні дефекти ЕД

Вузол ЕД	Дефект	Діагностичний параметр	Кількість пошкоджень	
			од.	%
Статор	Пошкодження фазної та міжвиткової ізоляції	опір ізоляції обмоток статора[1] [1], МОм.	52	30
	Обрив в обмотці статора	різниця струмів фазних обмоток[2], %.	3	2
	Вібрація статора та корпусу ЕД	віброзсув[3,8] в напрямках x, y, z, мкм.	9	5
	Перегрів обмотки статора та корпусу	температура[4,5] лобових частин обмоток та корпусу, °С.	15	9
	Перегрів сталі статора	температура[6] корпусу, струм холостого ходу[7] ЕД [4], °С.	5	3
Під-шипники	Забруднення	віброзсув корпусу, мкм	59	34
	Пошкодження верхнього кільця			
	Пошкодження нижнього кі льця			
	Пошкодження сепаратора			
	Пошкодження захисного кільця			
Ротор	Вібрація ротора	віброзсув[3], мкм.	5	3
	Обрив стержнів або поганий контакт з коротко замкнутими кільцями білячої клітки. Нагрів ротора. Зменшення обертів вала ротора на понад 10% від номінальної.	Зменшення кількості обертів вала ЕД, %.	2	1
	Зношування шийки валу під підшипниками	зменшення діаметра шийки валу під підшипниками ЕД, мкм.	3	2
Вентилятор	Заклинювання турбіни вентилятора, пошкодження лопатей турбіни, прокручування ротора ЕД відносно турбіни, перегрів ЕД, забруднення лопатей та захисної решітки	Температура корпусу ЕД, °С.	5	3
	Вібрація	Віброзсув, мкм.	5	3
		Понад нормований шум під час роботи, дБ.		
Брно	Нагрів корпусу, оплавлення та окислення шпильок, зростання опору контактів в брно	Опір контактів ≤0,05 Ом.	9	5
Разом			172	100

Верхні індекси, приведені в таблиці 1 мають наступне пояснення:

1 – Допустимий опір ізоляції обмотки статора напругою до 1 кВ електродвигунів змінного струму має бути не меншим 0,5 МОм при температурі 10-30 °С.

2 – Відповідно до норм МЕК перекіс за струмом фаз ЕД не перевищує 5%.

[3] – Допустимий вібро зсув для ЕД типу AIP 100 S2, потужністю 4 кВт, частотою обертів 3000 об. / хв. та після капремонту – 80 мкм.

[4] – Гранична температура обмоток статора електродвигунів що обдуваються серії А в захищеному закритому виконанні 3-5-го габаритів, що мають ізоляцію класу А – 95°С.

[5] – Температура на поверхні двигунів в сталому режимі на 15-20°С нижче температури обмоток. Підвищення температури двигунів викликано збільшенням струму в обмотках статора в порівнянні з номінальною. Тому для контролю за роботою двигунів потужністю 40 кВт і вище встановлюються амперметри.

[6] – Місцевий нагрів активної сталі статора відбувається через вигоряння і оплавлення сталі при коротких замиканнях в обмотці статора, а також при замиканні листів стали внаслідок торкання ротора за статор під час роботи двигуна або внаслідок руйнування ізоляції між окремими листами стали. Ознаками зачіпання ротора за статор є дим, іскри і запах гару; активна сталь в місцях торкання набуває вигляду полірованої поверхні; з'являється гудіння, що супроводжується вібрацією двигуна. Причиною чіпляння є: порушення нормального зазору між ротором і статором в результаті зношування підшипників, неправильної їх установки, внаслідок великого вигинання валу ротора, деформації сталі статора або ротора, одностороннього притягання ротора до статора через виткові замикання в обмотці статора, внаслідок сильної вібрації ротора, який визначають щупом.

[7] – Електродвигун переходить в режим холостого ходу, коли з його валу знімають робоче навантаження. В цьому випадку можна визначити такі важливі параметри функціонування ЕД, як струм намагнічування, потужність і коефіцієнт втрат в елементах приводу. Але головне – в режимі холостого ходу [3] можна визначити справність ЕД. Для трифазних асинхронних ЕД потужністю від 1,5 до 5,5 кВт при частоті 3000 обертів за хвилину допустиме значення струму холостого ходу не повинне перевищувати 45% від номінального струму ЕД.

[8] – Ослаблення пресування активної сталі осердя, що призводить до зростання вібрації корпусу статора. Вібрація листів сталі осердя призводить до розвитку контактної корозії металу. Контактна корозія руйнує ізоляцію листів сталі, що призводить до замикання та до додаткового нагріву осердя.

[9] – Викривлення осі валу (відхилення від співвісності шийок під підшипник не повинно бути більше 0,015 мм[4]).

Опис діагностичних параметрів, які характеризують дефекти приведені в таблиці 1, показаний в таблиці 2 [14].

Таблиця 2

Опис діагностичних параметрів.

Діагностичний параметр	Одиниця вимірювань	Нормативне значення	Позначення	Спрощене умовне позначення
Опір ізоляції обмотки статора	МОм	≥ 0,5	R	x_1
Віброзсув корпусу	мкм	<80	$s_к$	x_2
Перекіс фазних струмів статора	%	<5	ΔI	x_3
Температура обмоток статора	°С	<95	$t_{ст}$	x_4
Температура корпусу	°С	<75	$t_к$	x_5
Віброзсув ротора	мкм	<80	$s_р$	x_6
Віброзсув підшипників	мкм	<80	$s_п$	x_7
Віброзсув турбіни охолодження	мкм	<80	$s_т$	x_8
Температура брно	°С	<75	$t_б$	x_{10}
Струм обмотки статора	А	залежить від ЕД	$I_{ст}$	x_{11}

Для кращого розуміння алгоритму діагностування введемо інтегральні діагностичні параметри (ДП), зменшуючи попередню кількість ДП з десяти до шести.

Отже пропонуємо метод визначення технічного стану ЕД в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ЕД і в залежності від результату зробити висновок про один зі станів ЕД: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний та зменшити похибку прогнозування стану.

Таблиця 4

Спрощена таблиця пошкоджень ЕД

Вузол	Діагностичний параметр – коефіцієнт залишкового ресурсу	Кількість виведених з експлуатації ЕД	
		одиниць	%
Обмотка статора	Коефіцієнт залишкового ресурсу обмотки статора, $к_1$	57	31
Сталь статора	Коефіцієнт залишкового ресурсу сталі статора, $к_2$	7	4
Підшипники	Коефіцієнт залишкового ресурсу підшипників, $к_3$	49	27
Ротор	Коефіцієнт залишкового ресурсу ротора, $к_4$	21	12
Охолодження	Коефіцієнт залишкового ресурсу системи охолодження, $к_5$	19	11
Брно	Коефіцієнт залишкового ресурсу брно, $к_6$	29	15
Разом		172	100

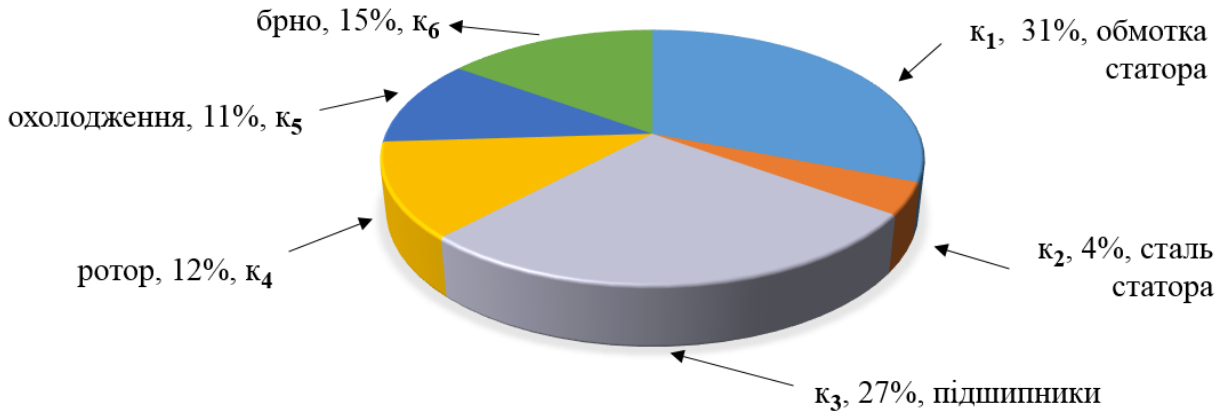


Рис. 6. Діаграма пошкоджень ЕД

Висновки

Результати аналізу факторів що викликають пошкодження ЕД на підприємствах АПК є підвищена вологість, перепади температур, вібрація, перенапруги, перевантаження.

Найчастішими причинами виведення ЕД з експлуатації є пошкодження підшипників та ізоляції обмотки статора.

Статистичні дані про пошкодження ЕД сформовані на основі досліджень ЕД підприємств агропереробної галузі України.

Література

1. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України / Г. М. Калетнік // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2019. – Вип. 4. – С. 90-98.

2. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrebskiy, Vladyslav Lesko. Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 209 p.

3. Гунько І. О. Аналіз програмних засобів для моделювання режимів роботи електричних систем / І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 3. – С. 138-141.

4. Buslavets O. A. Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / O. A. Buslavets, P. D. Lezhniuk, O. Y. Rubanenko. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. −2015. − No. №2/8(74). – P. 35–41.

5. Ткаченко А. А. Разработка устройства диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей / А. А. Ткаченко, В. А. Коновалов, С. В. Лагуненков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 4. – С. 76-81.

6. Рубаненко О. Є. Вплив вібрації контактів на подальшу роботу високовольтних вимикачів / О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко, О. О. Рубаненко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 1. – С. 72-76.

7. Rubanenko Olexander. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / Olexander Rubanenko, Oleg Kazmiruk, Valentyna Bandura, Victor Matvijchuk, Olena Rubanenko //Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies. – 2017. – № 4/3(88). – P. 66-79.

8. Alexey. Причины основных неисправностей двигателя: електронний ресурс. / Alexey // InfoElectrik. – 26.06.2016. – С. 76-81. Режим доступу: http://infoelectrik.ru/elektrodvigateli/osnovnye-neispravnosti-dvigatelya.html.

9. Круглова Т.Н. Причины основных неисправностей двигателя: електронний ресурс. / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко, Н. Н. Работалов, М. А. Мельников // Высоковольтные измерительные комплексы и системы. Режим доступу: http://www.viks.su/blog/kompleksnaya-diagnostika-moshchnyh-elektrodvigateley

10. Subhasis Nandi. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors − a review / Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, Xiaodong Li // IEEE transactions on energy conversion. −2005. –December. − Vol. 20. − No. 4. − P. 719-729.

11. Rubanenko O. Y. A Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi / O. Y. Rubanenko, O. O. Rubanenko, M.O. Hryshchuk // Przeglad elektrotechniczny. −2020. − No. 3. − P. 119-124.

12. Костин В. Н. Монтаж и эксплуатация оборудования систем электроснабжения: Учеб. пособие. − СПб.: СЗТУ, 2004 − 184 с.

References

1. Kaletnik G. M. Perspekty`vy` pidvy`shhennya energety`chnoyi avtonomiyi pidpry`yemstv APK v ramkax vy`konannya energety`chnoyi strategiyi Ukrayiny` / G. M. Kaletnik // Visny`k agrarnoyi nauky` Pry`chornomor'ya. – 2019. – Vy`p. 4. – S. 90-98.

2. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrebskiy, Vladyslav Lesko. Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 209 p.

3. Gun`ko I. O. Analiz programny`x zasobiv dlya modelyuvannya rezhy`miv roboty` elektry`chny`x sy`stem / I. O. Gun`ko // Visny`k Xmel`ny`cz`kogo nacional`nogo universy`tetu. – 2020. – # 3. – S. 138-141.

4. Buslavets O. A. Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / O. A. Buslavets, P. D. Lezhniuk, O. Y. Rubanenko. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. −2015. − No. #2/8(74). – P. 35–41.

5. Tkachenko A. A. Razrabotka ustrojstva dy`agnosty`rovany`ya obryvov y` mezhvy`tkovyx zamykany`j v statornyx obmotkax asy`nxronnyx dvy`gatelej / A. A. Tkachenko, V. A. Konovalov, S. V. Lagunenkov // Visny`k Donbas`koyi derzhavnoyi mashy`nobudivnoyi akademiyi. – 2012. – # 4. – S. 76-81.

6. Rubanenko O. Ye. Vply`v vibraciyi kontaktiv na podal`shu robotu vy`sokovol`tny`x vy`my`kachiv / O. Ye. Rubanenko, S. V. My`senko, O. O. Rubanenko // Vibraciyi v texnici ta texnologiyax. – 2013. – # 1. – S. 72-76.

7. Rubanenko Olexander. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / Olexander Rubanenko, Oleg Kazmiruk, Valentyna Bandura, Victor Matvijchuk, Olena Rubanenko //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – # 4/3(88). – P. 66-79.

8. Alexey. Pry`chy`ny osnovnyx ney`spravnostej dvy`gatelya: elektronny`j resurs. / Alexey // InfoElectrik. – 26.06.2016. – S. 76-81. Rezhy`m dostupu: http://infoelectrik.ru/elektrodvigateli/osnovnye-neispravnosti-dvigatelya.html.

9. Kruglova T.N. Pry`chy`ny osnovnyx ney`spravnostej dvy`gatelya: elektronny`j resurs. / T. N. Kruglova, Y`. V. Yaroshenko, N. N. Rabotalov, M. A. Mel`ny`kov // Vysokovol`tnye y`zmery`tel`nye kompleksy y` sy`stemy. Rezhy`m dostupu: http://www.viks.su/blog/kompleksnaya-diagnostika-moshchnyh-elektrodvigateley

10. Subhasis Nandi. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors − a review / Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, Xiaodong Li // IEEE transactions on energy conversion. −2005. –December. − Vol. 20. − No. 4. − P. 719-729.

11. Rubanenko O. Y. A Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi / O. Y. Rubanenko, O. O. Rubanenko, M.O. Hryshchuk // Przeglad elektrotechniczny. −2020. − No. 3. − P. 119-124.

12. Kosty`n V. N. Montazh y` эkspluatacy`ya oborudovany`ya sy`stem эlektrosnabzheny`ya: Ucheb. posoby`e. − SPb.: SZTU, 2004 − 184 s.

Надійшла / Paper received : 05.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-197-202
УДК 621.317

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, А.Г. ТКАЧУК, С.С. КОТЛЯР, О.І. ФАСОЛЯ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТРАНСФОРМАТОРНИЙ ГРАВІМЕТР АВТОМАТИЗОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

У роботі викладено відомості щодо нового типу чутливого елементу автоматизованого інформаційно-вимірювального комплексу (ІВК) – трансформаторного гравіметра. Під час проведення гравіметричних вимірів прискорення сили тяжіння g або гравітаційних аномалій g на літальних апаратах у геодезії, геології, геофізиці може бути використаний новий тип чутливого елементу – гравіметр трансформаторного типу. Показано, що новий трансформаторний гравіметр забезпечує більш високу точність вимірювань шляхом компенсації впливу вертикального прискорення та залишкових інструментальних похибок, залишкових похибок від проекцій горизонтальних перехресних прискорень та похибок, спричинених впливом зовнішніх електромагнітних потоків.

Ключові слова: трансформаторний гравіметр, інформаційно-вимірювальний комплекс.

O.M. BEZVESILNA, A.G. TKACHUK, S.S. KOTLYAR, O.I. FASOLYA
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TRANSFORMER GRAVIMETER AUTOMATED INFORMATION AND MEASURING COMPLEX

The paper presents information on a new type of sensitive element of the automated information-measuring complex (IVC) - transformer gravimeter. When performing gravimetric measurements of the acceleration of gravity g or gravitational anomalies g on aircraft in geodesy, geology, a new type of sensitive element can be used - a transformer-type gravimeter. The transformer gravimeter of the CPI contains a sensitive element, which consists of a magnetic circuit, a moving armature, a primary excitation winding and a secondary output winding, which has two identical sections. The two sections of the secondary winding are connected in series. The movable armature is connected to the motor, which lowers it sequentially down and up the magnetic circuit every second. The motor is controlled by a switching device that is connected to a control voltage source. The output signal from the secondary output winding is fed to the input of the output signal calculator, at the output of which the signal is proportional to twice the value of gravity acceleration and does not contain errors from the vertical acceleration of the aircraft, residual instrumental errors, residual errors from horizontal projections. and errors caused by external electromagnetic fluxes. It is shown that the new transformer gravimeter provides higher accuracy of measurements by compensating for the influence of vertical acceleration and residual instrumental errors, residual errors from the projections of horizontal cross-accelerations and errors caused by external electromagnetic fluxes.

Keywords: transformer gravimeter, information-measuring complex.

Вступ

Сьогодні актуальним є проведення авіаційних гравіметричних вимірювань шляхом використання автоматизованого інформаційно-вимірювального комплексу, одним із основних компонентів якого є чутливий елемент, гравіметр. Інформація від ІВК може бути широко використана в геодезії, геофізиці для вимірів прискорення сили тяжіння g або гравітаційних аномалій g, у картографії для вимірів форми Землі, в інерціальній навігації для корекції інерціальних навігаційних систем по гравітаційному полю Землі. У наш час подальше підвищення точності таких ІВК обмежене досягненням технологічної межі сучасних компонентів ІВК. Однак, підвищення точності, яке є завжди бажаним, можливе шляхом використання нових більш точних гравіметрів ІВК.

У літературі з авіаційної гравіметрії найбільш відомі гравіметри наступних типів: струнний ВНІІГеофізики (Росія), сильно демпфований Інституту фізики Землі (Росія), гіроскопічні (Україна) та деякі різновиди гравіметрів, модифіковані із наземних гравіметрів [1–7]. Однак, вони мають недостатню точність 2-8 мГал (1 мГал=10^{-5} м/с^2) [1–7]. Тому актуальною є задача: запропонувати новий більш точний гравіметр ІВС та обґрунтувати доцільність його використання в ІВС.

Мета роботи

Запропонувати новий більш точний гравіметр ІВС – трансформаторний гравіметр та обґрунтувати доцільність його використання в ІВС.

Виклад основного матеріалу дослідження

Запропонований трансформаторний гравіметр (ТрГ) може бути використаний для проведення гравіметричних вимірів у складі автоматизованого ІВС на літальних апаратах у геодезії, геології, геофізиці, інерціальних системах навігації.

Найбільш близьким до запропонованого ТрГ є відомий трансформаторний перетворювач ТП соленоїдного типу [8] (рис. 1).

Спільними суттєвими ознаками відомого ТП та нового ТрГ є те, що вони містять чутливий елемент, який складається із магнітопроводу, рухомого якоря, первинної обмотки збудження та вторинної вихідної обмотки, яка має дві однакові секції.

Проте, на відміну від нового ТрГ, відомий трансформаторний перетворювач має ряд недоліків.

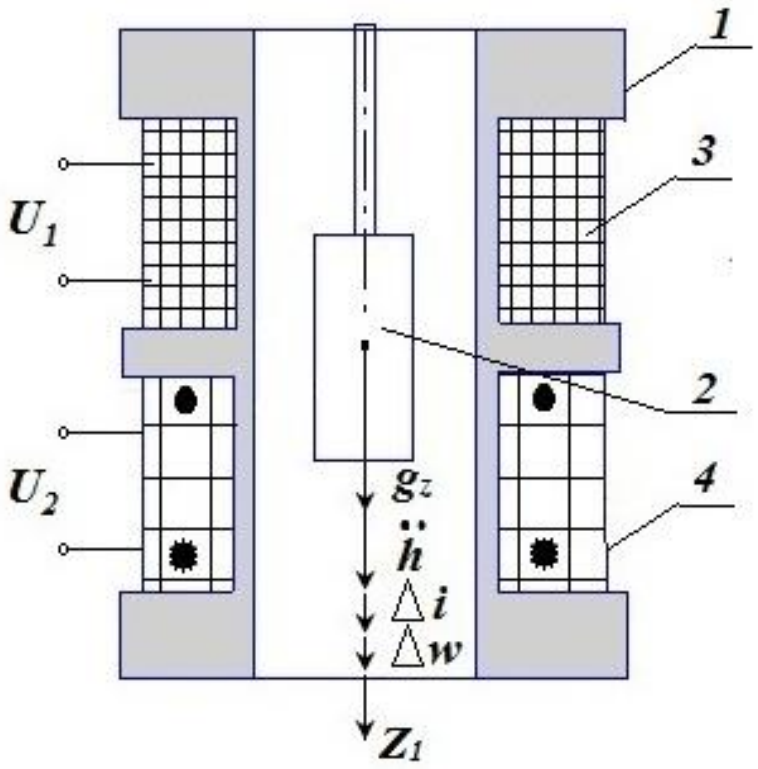


Рис. 1. Трансформаторний перетворювач
1 – магнітопровід, 2 – якір, 3 – обмотка збудження W_1, 4 – вторинна обмотка W_2

Дві секції вторинної обмотки 4 W_2 у ТП з'єднані послідовно узгоджено (початок-кінець однієї секції, початок-кінець іншої секції). Тобто, вихідна обмотка 4 W_2 суцільна (фіг. 1). Під дією прискорення сили тяжіння g_z, що діє вздовж осі чутливості трансформаторного перетворювача *Oz*, виникає сила тяжіння $G = mg_z$. Обмотка збудження 3 W_1 під'єднана до напруги U_1 і утворює електромагнітний потік збудження Φ_1. Згідно закону електромагнітної індукції, цей потік наводить ЕРС E_2 в обмотці 4 W_2. Під дією сили тяжіння якір 2 рухається в середині магнітопроводу 1 вниз і викликає зміну електромагнітного потоку Φ_1. Тоді електрорушійна сила E_2 в обмотці 4 W_2 буде змінюватись пропорційно прискоренню сили тяжіння g_z: $E_2 \equiv mg_z$. Вихідний електричний сигнал U_2 буде пропорційний g_z: $U_2 \equiv mg_z$.

При дії зовнішнього електромагнітного потоку перешкоди (на рухомих об'єктах: літальних апаратах, надводних та підводних човнах виникають значні сторонні електромагнітні потоки), наводитиметься ЕРС $E_П$ перешкоди у вихідній обмотці 4 W_2: $E_2 \equiv mg_z + E_n$. Відповідно, вихідний сигнал буде $U_2 \equiv mg_z + U_n$

Інструментальні похибки від впливу змін температури, вологості, тиску, моменту сил сухого тертя та ін. є значними у ТП і ніяким чином не компенсуються.

Вертикальне прискорення $\ddot{h}$, при встановленні ТП на літаках, буде діяти вздовж осі чутливості ТП, тоді: $E_2 \equiv mg_z + m\ddot{h}$. Величина $\ddot{h}$ у 10^3 разів [1] перевищує значення g_z.

Дія горизонтальних прискорень, при встановленні ТП на рухомій основі, буде викликати також значні похибки.

Таким чином, суттєвим недоліком ТП є низька точність вимірювань прискорення сили тяжіння.

В даній роботі **поставлено задачу** вдосконалення трансформаторного гравіметра, що містить чутливий елемент, який складається із магнітопроводу, рухомого якоря, первинної обмотки збудження та вторинної вихідної обмотки, яка має дві однакові секції, **шляхом** того, що дві секції вторинної обмотки з'єднані послідовно-зустрічно, а рухомий якір з'єднано з двигуном, який щосекунди послідовно опускає якір вниз та вверх по магнітопроводу, при чому двигуном керує пристрій перемикання, який підключено до джерела напруги управління, а вихідний сигнал з вторинної вихідної обмотки подається на вхід пристрою обчислення вихідного сигналу, на виході якого сигнал, що пропорційний подвоєному значенню прискорення сили тяжіння та не має у своєму складі похибок від впливу вертикального прискорення літака, залишкових інструментальних похибок, залишкових похибок від проекцій горизонтальних перехресних прискорень та похибок, спричинених впливом зовнішніх електромагнітних потоків, **щоб забезпечити**

підвищення точності вимірювань прискорення сили тяжіння.

Підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння у новому трансформаторному гравіметрі забезпечується наступним чином.

При дії зовнішнього електромагнітного потоку перешкоди, цей потік буде наводити дві ЕРС перешкоди у двох секціях W_2, які включено послідовно-зустрічно $E_{2П}$ та $-E'_{2П}$. Сумарна дія цих похибок на вихідний сигнал гравіметра-винаходу буде рівна нулю. Тобто, таке зустрічне з'єднання секцій забезпечує скасування похибок від впливу зовнішніх електромагнітних потоків, які можуть бути значними при встановленні гравіметра на рухомому об'єкті.

Дія інструментальних похибок від впливу змін температури, вологості, тиску, моменту сил сухого тертя та ін. буде скасовуватись аналогічним чином за рахунок зустрічного з'єднання двох секцій W_2.

Таким чином, запропонований трансформаторний гравіметр забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння.

Суть роботи нового ТрГ пояснюється рис2.

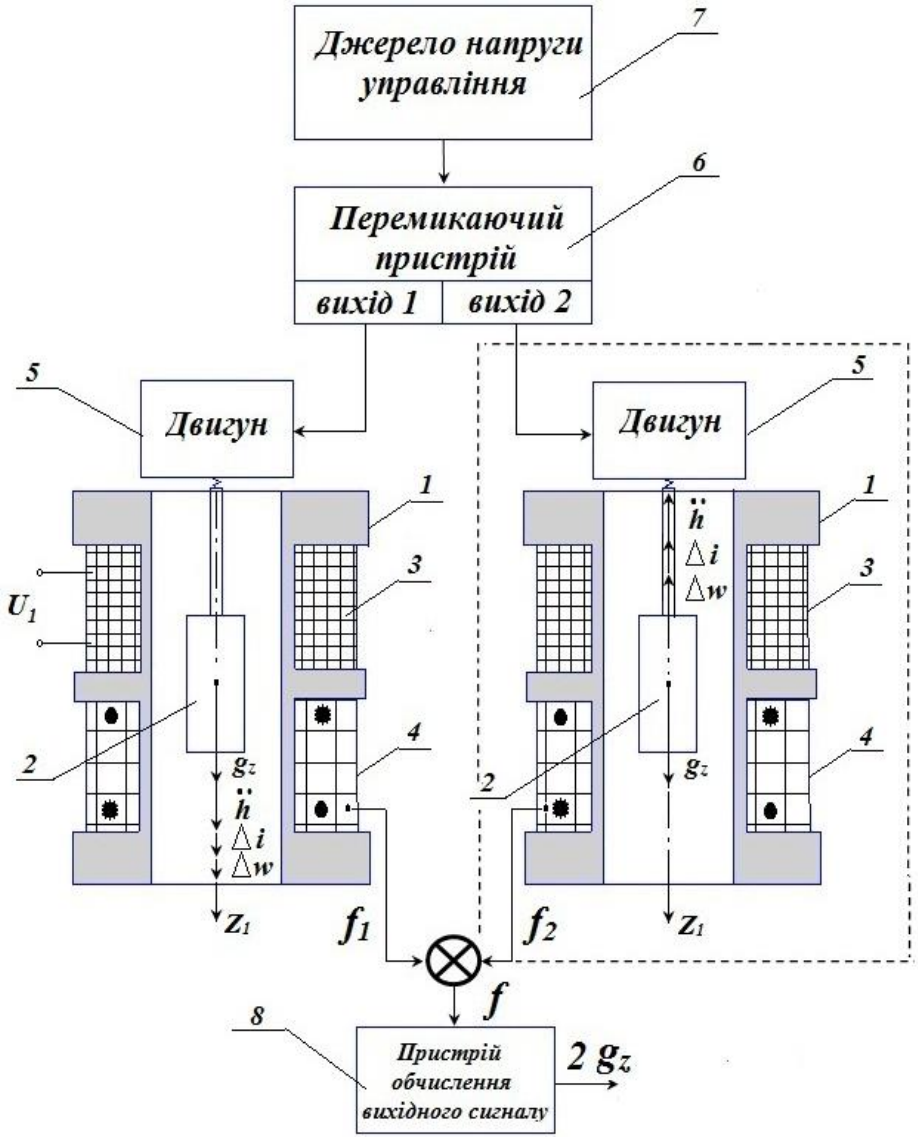


Рис. 2. Трансформаторний гравіметр

1 – магнітопровід, 2 – рухомий якір, 3 – обмотка збудження W_1, 4 – вторинна обмотка W_2, 5 – двигун, 6 – перемикаючий пристрій, 7 – джерело напруги управління, 8 – пристрій обчислення вихідного сигналу

У запропонованому ТрГ чутливий елемент складається із магнітопроводу 1, рухомого якоря 2, первинної обмотки 3 збудження та вторинної вихідної обмотки 4, яка має дві однакові секції. Дві секції вторинної обмотки 4 з'єднані послідовно-зустрічно. Рухомий якір 2 з'єднано з двигуном 5, який щосекунди послідовно опускає якір 2 вниз та вверх по магнітопроводу 1. Двигуном 5 керує пристрій перемикання 6, який підключено до джерела 7 напруги управління. Вихідний сигнал з вторинної вихідної обмотки 4 подається на вхід пристрою 8 обчислення вихідного сигналу, на виході якого сигнал, що пропорційний подвоєному значенню прискорення сили тяжіння та не має у своєму складі похибок від впливу

вертикального прискорення літака, залишкових інструментальних похибок, залишкових похибок від проекцій горизонтальних перехресних прискорень та похибок, спричинених впливом зовнішніх електромагнітних потоків.

Новий трансформаторний гравіметр працює наступним чином.

Під дією прискорення сили тяжіння g_z, що діє вздовж осі чутливості ТрГ *Oz*, виникає сила тяжіння $G = mg_z$.

Обмотка збудження W_1 під'єднана до напруги U джерела 7 живлення і утворює електромагнітний потік збудження Φ_1. Згідно закону електромагнітної індукції, цей потік наводить дві ЕРС E_2 та $-E_2'$ в двох секціях обмотки W_2.

Під дією сили тяжіння якір 2 рухається в середині магнітопроводу 1 вниз і викликає зміну електромагнітного потоку Φ_1 та відповідно E_2 та $-E_2'$.

У середній точці (електромагнітної симетрії ТрГ) матимемо $E_2 = |-E_2'|$ і вихідний сигнал $U_2 = 0$.

При зміщенні якоря 2 відносно точки симетрії вниз (рис. 2) або вверх (рис. 2, обведено пунктиром) $E_2 \neq |-E_2'|$, вихідний сигнал гравіметра буде пропорційний:

$$U_2 \equiv |E_2 - E_2'| \equiv mg_z. \quad (1)$$

У новому ТрГ додатково введено пристрій-перемикач (ПП) 6, який живиться від джерела напруги 7 управління, що через рівні інтервали часу в 1 с перемикає подачу вертикального руху якоря 2 вниз (рис. 2) та вверх (рис. 2, обведено пунктиром) через двигун 5.

При подачі від ПП 6 імпульсу руху вниз якорю 2, вихідний сигнал f_1 чутливого елементу подається у пристрій 8 обчислення вихідного сигналу. Через 1с подається імпульс руху вверх якорю 2 і до пристрою 8 обчислення вихідного сигналу надходить сигнал f_2.

У пристрої обчислення вихідного сигналу 7 формується кінцевий вихідний сигнал:

$$f = f_1 + f_2 = g_z + \ddot{h} + \Delta i + \Delta w + g_z - \ddot{h} - \Delta i - \Delta w = 2g_z, \quad (2)$$

де $f_1 = g_z + \ddot{h} + \Delta i + \Delta w$ - вихідний сигнал при русі якоря 2 вниз;

$f_2 = g_z - \ddot{h} - \Delta i - \Delta w$ - вихідний сигнал при русі якоря 2 вверх;

$\ddot{h}$ - вертикальне прискорення літака;

Δi - залишкові інструментальні похибки;

Δw - залишкові похибки від впливу проекцій горизонтальних перехресних прискорень на вісь чутливості винаходу.

Тобто, у пристрої 8 обчислення вихідного сигналу ТрГ формується вихідний сигнал, який рівний подвоєному значенню $2g_z$. У сигналі відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення $\ddot{h}$, залишкові інструментальні похибки Δi та залишкові похибки від впливу горизонтальних перехресних прискорень Δw.

Отже, точність запропонованого нового трансформаторного гравіметра буде значно вищою. Впливи вертикального прискорення, залишкових інструментальних похибок, залишкових горизонтальних прискорень є значними у відомих типів гравіметрів (струнного, сильно демпфованого, гіроскопічних та ін.) і призводять до значних похибок. Лише наявність вертикального прискорення літака у 10^3 перевищує корисний сигнал прискорення сили тяжіння.

Перспективи подальших досліджень

У подальшому, очевидно, що доцільно пропонувати та досліджувати нові різновиди гравіметрів, робота яких основана на нових фізичних принципах дії. Також перспективно досліджувати двоканальні схеми гравіметрів, що дозволяють суттєво підвищити точність вимірювань та компенсувати вплив багатьох завад. Необхідно досліджувати вплив не ідентичності параметрів каналів на результуючу точність вимірювань.

Висновки

1. Запропоновано новий тип гравіметра автоматизованого інформаційно-вимірювального комплексу, що працює на літаку, – трансформаторній гравіметр, який відрізняється від відомого трансформаторного перетворювача наявністю додаткових елементів конструкції та новим з'єднанням обмоток.

2. Обґрунтовано доцільність використання нового ТрГ в автоматизованому ІВК: показано, що новий ТрГ має більш високу точність за рахунок компенсації впливів вертикального прискорення, залишкових інструментальних похибок, залишкових горизонтальних прискорень. Останні є значними у відомих типів гравіметрів (струнного, сильно демпфованого, гіроскопічних та ін.).

Література

1. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри / Безвесільна О.М. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 504 с.

2. Безвесільна О.М. Основи теорії та принципи побудови автоматизованої авіаційної гравіметричної системи з п'єзоелектричним гравіметром / Безвесільна О.М., Якименко Ю.І., Ткачук А.Г. – Київ : ДП НВЦ «Пріоритети, 2017. – 288 с.

3. Безвесільна О.М. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи : монографія / Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. – Київ : ДП НВЦ «Пріоритети», 2017. – 181 с.

4. Безвесільна О.М. Вібраційний чутливий елемент приладового комплексу / Безвесільна О.М., Чепюк Л.О. –КПІ ім. Ігоря Сікорського ДП НВЦ «Пріоритети», 2018. – 235 с.

5. Безвесільна О.М. Прецизійний приладовий навігаційний комплекс та його чутливі елементи / Безвесільна О.М. – КПІ ім. Ігоря Сікорського ДП НВЦ «Пріоритети, 2019. – 451 с.

6. Безвесільна О.М. Двокомпонентний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої гравіметричної системи / Безвесільна О.М. – КПІ ім. Ігоря Сікорського ДП НВЦ «Пріоритети, 2020. – 250 с.

7. Bezvesilna O.M. Stabilization system of aviation gravimeter / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Nowicki M. // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2015. – Vol. 6. Issue 8. – P. 956–958.

8. Безвесільна О.М. Перетворюючі фізичних величин. Технічні засоби автоматизації : підручник / О.М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – 809 с.

9. Bezvesilna O.M. Design of Piezoelectric Gravimeter for Automated Aviation Gravimetric System / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. // International Journal of Automation, Mobile Robotics & Entelligent Systems, Vol. 10 № 1, January 2016, p. 43–47.

10. Bezvesilna O.M. Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. // Springer International Publishing Switzerland Journal. Challeges in Automation, Mobile Robotics and Measurement Techniques. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol.10, January 2016, p. 753–755.

11. Bezvesilna O.M. Two-channel MEMS gravimeter for the automated aircraft gravimetric system / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Chilchenko T. // Systems, Control and Information Technology, Warsaw, POLAND, 20-21.05.16, p. 29.

12. Безвесільна О.М. Simulation of influence of perturbation parameters of the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Т.В. Хильченко, С.О. Нечай // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 6/7(84). – С. 50–57.

13. Bezvesilna O.M. Introducing The Principle of Constructing an Aviation Gravimetric System With Any Type of Gravimeter / Bezvesilna O.M., A. Tkachuk, L. Chepyuk, S. Nechai, T. Khylchenco // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2017. – №1/7(85). – С. 45–56.

14. Bezvesilna O.M. Gravimeters o Aviation Gravimetric System: Classification, Comparative Analysis, Prospects / O.M. Bezvesilna, M. Kaminski // International Publishing Switzerland Journal Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 550, Automation – 2017. – P. 496–504.

15. Bezvesilna O.M. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / O.M. Bezvesilna, I. Cherepanska, A. Sazonov, S. Nechai, T. Khylchenco // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2017. – № 5/9(89). – С. 58–67.

16. Безвесільна О.М. Триступеневий гіроскоп як чутливий елемент системи стабілізації АГС / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, А.В. Коваль, Д.Д. Шарапов // Sheffield Science and Education LTD, 2018. December 30. 2017-January 7. 2018. V.11. – England. – P. 17–20.

17. Безвесільна О.М. Будова та принцип роботи нового прецизійного п'єзоелектричного чутливого елемента системи стабілізації /О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук // Вчені записки Таврійського Національного університету ім. В.І. Вернадського Серія «Технічні науки». – 2018. – Том 29 (68). № 3. – С. 54–58.

18. Безвесільна О.М. Дослідження поведінки динамічно-настроюваного чутливого елемента / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2018. – 2(82). – С. 185–188.

19. Безвесільна О.М. Трикоординатний гравіметр з виставленням осей чутливості на основі цифрових відео зображень / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, Ю.О. Шавурський, С.О. Нечай // ICRIS 2019: The 2 nd International Conference on Robotics and Intelligent System Warsaw, Poland, February 23–25, 2019. – P. 89–93.

20. Bezvesilna O.M. Stabilization system with piezoelectric sensor /O.M. Bezvesilna, A. Tkachuk, A. Ostapchuk // The 1st International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" (September 25–27, 2019) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2019. 25–28 p.

21. Bezvesilna O.M. Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers /O.M. Bezvesilna, O. Petrenko, V. Galycky, M. Ilchenko // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – № 1/9(103). – С. 39–45.

22. Korobiichuk I. Numerical Modeling of Dynamic Disturbances Acting on the Sensitive Elements of an Instrument Navigation System Conference on Automation / Igor Korobiichuk, Olena Bezvesilna, Yuriy Podchashinskiy, Katarzyna Rzeplińska-RykałaSpringer // Nature is making SARS-CoV-2 and COVID-19 research

free. Conference on Automation 2020. P. 279–288.

23. Tkachuk A. Information and measurement system of weapon stabilization parameters based on precision piezoelectric sensitive element / Andrii Tkachuk, Olena Bezvesilna, Aleksandr Dodrzhanskyi, Anna Ostapchuk, Mykola Horodyskyi // E3S Web of Conferences Volume 166 (2020) The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020) Kryvyi Rih, Ukraine, May 20–22, 2020.

24. Humeniuk A. Information and measurement system for determining the acceleration of gravity based on a ballistic gravimeter with a two-dimensional video system / Anna Humeniuk, Olena Bezvesilna, Martin Bogdanovskyi and Valentyn Yanchuk // E3S Web of Conferences Volume 166 (2020) The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020) Kryvyi Rih, Ukraine, May 20–22, 2020.

References

1. Bezvesilna O.M. Aviatsiini hravimetrychni systemy ta hravimetry / Bezvesilna O.M. – Zhytomyr : ZhDTU, 2007. – 504 s.

2. Bezvesilna O.M. Osnovy teorii ta pryntsypy pobudovy avtomatyzovanoi aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy z piezoelektrychnym hravimetrom / Bezvesilna O.M., Yakymenko Yu.I., Tkachuk A.H. – Kyiv : DP NVTs «Priorytety, 2017. – 288 s.

3. Bezvesilna O.M. Dvokanalnyi MEMS hravimetr avtomatyzovanoi aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy : monohrafiia / Bezvesilna O.M., Khylchenko T.V. – Kiiv : DP NVTs «Priorytety», 2017. – 181 s.

4. Bezvesilna O.M. Vibratsiinyi chutlyvyi element pryladovoho kompleksu / Bezvesilna O.M., Chepiuk L.O. –KPI im. Ihoria Sikorskoho DP NVTs «Priorytety», 2018. – 235 s.

5. Bezvesilna O.M. Pretsyziinyi pryladovyi navihatsiinyi kompleks ta yoho chutlyvi elementy / Bezvesilna O.M. – KPI im. Ihoria Sikorskoho DP NVTs «Priorytety, 2019. – 451 s.

6. Bezvesilna O.M. Dvokomponentnyi piezoelektrychnyi hravimetr avtomatyzovanoi hravimetrychnoi systemy / Bezvesilna O.M. – KPI im. Ihoria Sikorskoho DP NVTs «Priorytety, 2020. – 250 s.

7. Bezvesilna O.M. Stabilization system of aviation gravimeter / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Nowicki M. // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2015. – Vol. 6. Issue 8. – R. 956–958.

8. Bezvesilna O.M. Peretvoriuiuchi fizychnykh velychyn. Tekhnichni zasoby avtomatyzatsii : pidruchnyk / O.M. Bezvesilna. – Zhytomyr : ZhDTU, 2019. – 809 s.

9. Bezvesilna O.M. Design of Piezoelectric Gravimeter for Automated Aviation Gravimetric System / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. // International Journal of Automation, Mobile Robotics & Entelligent Systems, Vol. 10 № 1, January 2016, p. 43–47.

10. Bezvesilna O.M. Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. // Springer International Publishing Switzerland Journal. Challeges in Automation, Mobile Robotics and Measurement Techniques. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol.10, January 2016, p. 753–755.

11. Bezvesilna O.M. Two-channel MEMS gravimeter for the automated aircraft gravimetric system / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Chilchenko T. // Systems, Control and Information Technology, Warsaw, POLAND, 20-21.05.16, p. 29.

12. Bezvesilna O.M. Simulation of influence of perturbation parameters of the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance / O.M. Bezvesilna, A.H. Tkachuk, T.V. Khylchenko, S.O. Nechai // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2016. – № 6/7(84). – S. 50–57.

13. Bezvesilna O.M. Introducing The Principle of Constructing an Aviation Gravimetric System With Any Type of Gravimeter / Bezvesilna O.M., A. Tkachuk, L. Chepyuk, S. Nechai, T. Khylchenco // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2017. – №1/7(85). – S. 45–56.

14. Bezvesilna O.M. Gravimeters o Aviation Gravimetric System: Classification, Comparative Analysis, Prospects / O.M. Bezvesilna, M. Kaminski // International Publishing Switzerland Journal Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 550, Automation – 2017. – P. 496–504.

15. Bezvesilna O.M. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / O.M. Bezvesilna, I. Cherepanska, A. Sazonov, S. Nechai, T. Khylchenco // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2017. – № 5/9(89). – S. 58–67.

16. Bezvesilna O.M. Trystupenevyi hiroskop yak chutlyvyi element systemy stabilizatsii AHS / O.M. Bezvesilna, A.H. Tkachuk, A.V. Koval, D.D. Sharapov // Sheffield Science and Education LTD, 2018. December 30. 2017-January 7. 2018. V.11. – England. – R. 17–20.

17. Bezvesilna O.M. Budova ta pryntsyp roboty novoho pretsyziinoho piezoelektrychnoho chutlyvoho elementa systemy stabilizatsii /O.M. Bezvesilna, A.H. Tkachuk // Vcheni zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho Seriia «Tekhnichni nauky». – 2018. – Tom 29 (68). № 3. – S. 54–58.

18. Bezvesilna O.M. Doslidzhennia povedinky dynamichno-nastroiuvanoho chutlyvoho elementa / O.M. Bezvesilna, A.H. Tkachuk // Visnyk ZhDTU. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2018. – 2(82). – S. 185–188.

19. Bezvesilna O.M. Trykoordynatnyi hravimetr z vystavlenniam osei chutlyvosti na osnovi tsyfrovykh video zobrazhen / O.M. Bezvesilna, Yu.O. Podchashynskyi, Yu.O. Shavurskyi, S.O. Nechai // ICRIS 2019: The 2 nd International Conference on Robotics and Intelligent System Warsaw, Poland, February 23–25, 2019. – R. 89–93.

20. Bezvesilna O.M. Stabilization system with piezoelectric sensor /O.M. Bezvesilna, A. Tkachuk, A. Ostapchuk // The 1st International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science” (September 25–27, 2019) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2019. 25–28 p.

21. Bezvesilna O.M. Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers /O.M. Bezvesilna, O. Petrenko, V. Galycky, M. Ilchenko // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – № 1/9(103). – С. 39–45.

22. Korobiichuk I. Numerical Modeling of Dynamic Disturbances Acting on the Sensitive Elements of an Instrument Navigation System Conference on Automation / Igor Korobiichuk, Olena Bezvesilna, Yuriy Podchashinskiy, Katarzyna Rzeplińska-RykałaSpringer // Nature is making SARS-CoV-2 and COVID-19 research free. Conference on Automation 2020. P. 279–288.

23. Tkachuk A. Information and measurement system of weapon stabilization parameters based on precision piezoelectric sensitive element / Andrii Tkachuk, Olena Bezvesilna, Aleksandr Dodrzhanskyi, Anna Ostapchuk, Mykola Horodyskyi // E3S Web of Conferences Volume 166 (2020) The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020) Kryvyi Rih, Ukraine, May 20–22, 2020.

24. Humeniuk A. Information and measurement system for determining the acceleration of gravity based on a ballistic gravimeter with a two-dimensional video system / Anna Humeniuk, Olena Bezvesilna, Martin Bogdanovskyi and Valentyn Yanchuk // E3S Web of Conferences Volume 166 (2020) The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020) Kryvyi Rih, Ukraine, May 20–22, 2020.

Надійшла / Paper received : 06.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-203-212
УДК 681.5

О.Я. ВОЛОШАНЮК, О.В. НЕЧИПОРЕНКО
Черкаський державний технологічний університет

СИНТЕЗ ПОДОБИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧОЮ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

У статті розглянуто проблему швидкості реакції системи керування швидкодіючої редукційно-охолоджувальної установки пари у енергогенеруючій галузі і хімічній промисловості. Запропоновано стратегію керування процесом за випереджуючим прогнозом. В якості критерію запропоновано момент настання передвідмовного стану, який обчислюється порівнянням обчисленого за показаннями датчиків поточного значення повної енергії пари з його гранично припустимим значенням. Запропоновано варіант алгоритму системи керування.

Ключові слова: швидкодіюча редукційно-охолоджувальна установка, енергогенеруюча галузь, керування процесом за випереджуючим прогнозом, передвідмовний стан, алгоритм системи керування.

O.YA.VOLOSHANIUK, O.V. NECHYPORENKO
Cherkasy State Technological University

THE SYNTHESIS OF THE QUICK-RESPONSE REDUCTION-COOLING DEVICE'S CONTROLSYSTEM

The problem of quick-response steam flow reduction-cooling device control system used in energy branch and chemical industry is considered in the paper. The experience of last disasters with nuclear power plants and in chemical industry shows that the safety problem is still acute there and that the comparative rareness of such matters is balanced by severity of damages and number of casualties. The key factor which strongly limits any effort to upgrade safety is mechanical inertia of executive devices. The control system's response time is the sole criteria, determining either disaster's elimination or its increase. But just the system's respond time remains in right dependence of executive devices' masses as well total amounts of energy-carrying media, their temperature, pressure, flow rates, etc. As about quick-response reduction cooling devices (QRCD) the problem is multiplied by such a fact that consumers of steam prefabricated by the QRCD also need a lot of time for preparing in order to avoid their damage. It seems this problem has no resolving via traditional methods. Because all known algorithms embodied in practice act in post-factum mode. I.e. control system's command signals are generated upon receiving alarm. So the principally novel approach is proposed in this paper both for QRCD control systems and other ones of similar purpose. Namely it is proposed to change reactive control system acting post-factum by active one based on advanced forecast. It includes involving of the term of prior-to-fail system's state. The prior-to-fail time is proposed as criteria to realize control together with the term of full energy reserve. This algorithm envisages the foregoing definition of maximal allowed overheated steam flow parameters and full energy (per second) value calculated on a basis of them. While operating current parameters values are measured via sensors and current full energy figure is calculated together with its first and second derivatives. Time between current and maximal full energy (rate) values is calculated. While this figures approaches to the system's response time such state is considered as the prior-to-fail state, and preparation-to-bypassing routine starts at this moment. The version of control system algorithm is proposed.

Keywords: high-speed reduction and cooling unit, energy generating industry, process control according to the advanced forecast, pre-failure state, control system algorithm.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Як відомо, редукційно-охолоджувальні установки (РОУ) та швидкодіючі редукційно-охолоджувальні установки (ШРОУ) застосовуються у енергетиці (у схемах енергоблоків) та у хімічній промисловості (наприклад, у виробництві поліетилену) для редукування тиску та зниження температури пари до заданих параметрів. ШРОУ призначені для відведення пари, яка продукується котлом чи парогенератором, але не споживається турбіною, а потрапляє у пароприймальні пристрої конденсатора чи до колектора власних потреб блока для резервування живлення привідних турбін, живильних насосів і повітронагнітачів, а також для подавання пари на прогрівання трубопроводів проміжного перегріву. Відмінність РОУ і ШРОУ в тому, що РОУ призначені для постійної роботи на споживача. А ШРОУ, в певному сенсі, грають роль запобіжного клапана системи – забезпечуючи поглинання чи скидання того надлишку енергії, який з тієї чи іншої причини, система не може спожити. Але, на відміну від класичного запобіжного клапана, який просто розсіює енергію пари у зовнішньому середовищі, ШРОУ дозволяє, певною мірою, утилізувати таку енергію, тим самим підвищуючи ККД усієї системи.

Відповідно до назви, РОУ і ШРОУ мають двохступінчасту схеми роботи (відмінність ШРОУ тут лише у швидкодії, періодичності дії та у переліку споживачів пари). На першому ступені в усіх випадках здійснюється редукція тиску гострої (перегрітої) пари – класичним засобом газодинаміки, дроселюванням. Природно, що енергетичний баланс тут практично не змінюється.

Спадання потенційної енергії температури і тиску пари конвертується у зріст кінетичної енергії швидкості потоку Стосовно ж другого етапу, охолодження пари з перегрітої до насиченої, зараз відомі три різних способи. Перший (відома, повсюдно застосована технологія) – це впорскування води у потік пари за допомогою інжекторів. З-за порівняно великої теплоємності процесів нагрівання крапель води та пароутворення на них витрачається надлишок енергії пари. Який, в даному випадку конвертується у збільшення загальної маси пари (з-за рахунок доданої маси води), проте з нижчими енергетичними параметрами (насичена пара замість перегрітої).

Особливістю таких галузей, як енергетика та хімічна промисловість є те, що порівняно низька

частота надзвичайних подій у них поєднана з тяжкими наслідками кожної аварій чи катастрофи. Причина криється у тому, що обидві ці галузі оперують з речовинами з великим рівнем енергії, неконтрольоване вивільнення якої може спричинити людські жертви, пошкодження майна та шкоду навколишньому середовищу. При настанні таких подій критичним є чинник часу. Чим точніше і раніше система керування енергетичним чи хімічним об'єктом може відстежити і відреагувати на настання надзвичайної події, тим меншою є імовірність шкоди. Але швидкодія системи керування завжди має фізичні обмеження, спричинені як інерційністю виконання обчислень та формування командних сигналів, так і інерційністю виконавчих механізмів: клапанів, дроселів тощо – особливо великогабаритних та таких, що оперують із великим тиском, температурою та іншими параметрами енергоносіїв.

Аналіз останніх досліджень

Щодо конкретно швидкодіючих редукційно-охолоджувальних установок, ряд публікацій, окрім низької швидкодії взагалі, нарікають ще й на специфічні недоліки, притаманні саме даній схемі. Останні пов'язані з великою швидкістю потоку і, відповідно, з нестачею часу на нагрів крапель води і перетворення їх на пару. Тому краплі води виносяться з охолоджувача у вихідний трубопровід, осідають на його стінках, викликаючи локальний термічний шок, концентрацію термічних напружень і подальше розтріскування стінок труб. Для вирішення вищенаведених проблем у літературі, вивченій за даною тематикою, пропонуються альтернативні варіанти виконання охолоджувальної частини контуру ШРОУ. Перший [1] передбачає пропускання пари (дотично, або під гострим кутом) крізь кільце води, яке обертається. Для утримання води або пароводяної суміші від винесення з-за придання їм кінетичної енергії пари процес здійснюють у полі відцентрових сил у спеціально спрофільованій камері змішування, де і створюють обертальний кільцевий шар води, проходячи крізь який від периферії до центра пар знижує свої параметри. Завдяки відцентровим силам тиск на зовнішньому кільця більше тиску на його внутрішньому боці, і ця різниця залежить від швидкості обертання кільця, його товщини, діаметра и густини. Проходячи крізь це обертальне кільце від периферії до к центру, пара переміщується з області з більш високим тиском до області з нижчим тиском, і таким чином, знижує свій тиск. При цьому пара проходить набагато більший шлях, аніж у звичайному охолоджувачі. Окрім того, водяне кільце, саме по собі діє як сепаратор крапель: відцентрова сила набагато сильніше діє на концентровані маси крапель, аніж на молекули пари, і притискає перші до стінок кільця. Частина первинної пари конденсується у воді кільця, а вторинна пара (з нижчими параметрами) виділяється при об'ємному кипінні поблизу внутрішнього боку кільця. Вихідна пара залежно від потреби, може бути перегрітою, сухою чи вологою, насиченою.

Нарешті, третім варіантом виконання охолоджувальної частини контуру ШРОУ є встановлення додаткової паротурбінної установки [2]. В даному випадку кінетична енергії потоку пари напряму трансформується у електричну енергію, отже, утилізація надлишкової енергії здійснюється найбільш ефективно.

Що ж до наукового апарату відображення перехідних процесів у системі, та згідно з [3] параметри потоку пари визначаються так:

$$\sigma_{вих}^{(p=const)} = \sigma_{вих}^{(p=var)} + K_{рег}^{(вих)}(s)\Delta X_{рег}^{p=const} \quad \sigma_{ВЫХ}^{(p=const)} = \sigma_{ВЫХ}^{(p=var)} + K_{РЕГ}^{(ВЫХ)}(s)\Delta X_{РЕГ}^{p=const}, \tag{1}$$

де $\sigma_{вих}^{(p=const)}$ – зміна вихідного параметра $\sigma_{вих}$ при заданому збуренні при p=cons;

$\sigma_{вих}^{(p=var)}$ – зміна параметра $\sigma_{вих}$при заданому збуренні в умовах p=var;

$K_{рег}^{(вих)}$– передаточна функція вихідного параметра відносно регулювального діяння;

$\Delta X_{рег}^{p=const}$ – зміна параметра при даному регулювальному діянні системи регулювання тиску перед споживачем. Для оцінки якості регулювання у [3] пропонується інтегральний критерій:

$$I = \int_0^{\infty} \sigma^2 \, dt, \tag{2}$$

де σ– регульований параметр.

Для часу сервомотора (виконавчого механізму) наводяться такі оптимальні значення T_{conm}:

- Для П та ПІ-регуляторів $T_{conm} \approx 2\tau$, з допуском $T_{conm} \approx (1\ldots4)\tau$;
- Для ПІД-регуляторів $T_{conm} \approx \tau$, з допуском $T_{conm} \approx (0{,}75\ldots2)\tau$;

У [4] розглядається питання ідентифікації динамічних характеристик об'єктів керування теплотехнічного обладнання. Для випадку стрибкоподібного вхідного сигналу передаточна функція моделі вищого порядку із запізнюванням відображається, як:

$$y = \frac{Ke^{-\tau_0 s}}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)\ldots.(T_i s+1)} \tag{3}$$

За методом Андерсона крива розгону об'єкта регулювання записується у вигляді:

$$\sigma(t) = AK + K_1 e^{\frac{-t}{T_1}} - K_2 e^{\frac{-t}{T_2}} \tag{4}$$

де $K_1, K_2 > 0$, якщо $T_2 > T_1$

У [5] наведені рівняння теплового балансу енергогенеруючої системи. На вході до турбіни генератора:

$$G_0 = \frac{N_e}{\sum \alpha_j H_i \eta_T \eta_Г} \tag{5}$$

де N_e – задана електрична потужність турбогенератора;

η_T, $\eta_Г$ – механічний ККД турбіни і генератора;

α_j, H_i– внутрішня робота на 1 кг свіжої пари

На виході з котла:

$$G_{пп}=\alpha_к G_0 \quad (6)$$

де $\alpha_к \approx 1+\alpha_у (\alpha_у \approx 0{,}02)$

Рівняння теплового навантаження котла:

$$Q_K=G_{пп}(h_0-h_{пв})+G_{вп}\left(h^T-h^0_{вп}\right) \quad (7)$$

Рівняння витрати тепла на турбоустановку:

$$Q_т=G_т(h_0-h_{пв})+G_{вп}\left(h^T-h^0_{вп}\right) \quad (8)$$

де $h^T - h^0_{вп}$ – різниця ентальпій до і після вторинного перегріву

У [6] для скорочення часу реакції системи автоматичного регулювання пропонується використання ПІД-регулятора спільно з додатковим пристроєм компенсації внутрішнього збурення системи. Передаточна функція регулятора пропонується у вигляді:

$$W_p(p)=\frac{k_p(T_i p+1)(T_д p+1)}{T_i p} \quad (9)$$

де $k_p, T_i, T_Д$ відповідно, коефіцієнт передачі регулятора, час інтегрування, час диференціювання. А передаточна функція пристрою компенсації внутрішнього збурення представлена диференціювальною ланкою другого порядку інерційності:

$$W_д(p)=\frac{k^*_д T^*_д p}{(T^*_д p+1)(T_1 p+1)} \quad (10)$$

де $k^*_д=1/k_p$; $T^*_д= T^*_i$; $T_1= T_д$;

$k^*_Д$ $k^*_д$ – коефіцієнт передачі; $T^*_д$ – час диференціювання; T_1 – менша постійна часу.

В якості **критики існуючих літературних джерел** слід зазначити, що всі запропоновані нові рішення здатні, певною мірою, підвищити економічність ШРОУ. В той же час жодне рішення практично не здатне якісно поліпшити швидкодію ШРОУ у аварійній ситуації. І, нарешті, зовсім не враховується та обставина, що стрибкоподібний приріст енергії, яка видається ШРОУ при байпасуванні потоку пари може мати руйнівне діяння на споживачів ШРОУ. Цілком очевидним є той факт, що, по-перше, споживачі потоку пари, що обробляється у ШРОУ, **потребують певного проміжку часу** для підготовку прийому пари. І, по-друге, форма графіку потоку пари від часу має бути **якомога пологою,** без різких перепадів. Отже, має місце певне протиріччя між вимогами практики предметної області та поточним станом науки, яка іще не запропонувала стратегії керування процесами та алгоритми, які б задовольнили вимоги практики.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Дана стаття має на меті розробку такої стратегії керування ШРОУ, алгоритмів роботи і складу системи ШРОУ, які б дозволили скоротити, або навіть звести до нуля запізнення в часі (щодо настання надзвичайної події) процесу підготовки споживачів потоку пари, продукованого ШРОУ, та мінімізувати швидкість зростання енергетичних параметрів пари, що надходить до споживачів.

Виклад основного матеріалу

При моделюванні будь-якої технічної системи з керованими/регульованими параметрами роботи обов'язково треба враховувати і систему керування/регулювання. Бо характеристики останньої: алгоритми програмного забезпечення, продуктивність обчислювача, похибка обчислень, порогові значення чутливості і робочі діапазони датчиків, інерційність та параметри роботи виконавчих механізмів (приводів клапанів, тощо) найсуттєвішим чином впливають на параметри усієї системи в реальній експлуатації. Природно, що склад і алгоритми роботи системи керування визначатимуться її призначенням та умовами роботи [7]:

Систему ШРОУ ми розглядатимемо, як систему аварійного скидання надлишку енергії. Подібні системи характеризуються сімома режимами роботи:

1) Запуск: вмикання ШРОУ, самоконтроль обчислювального блоку (блоків), контроль роботи датчиків та виконавчих механізмів (приводів клапанів, тощо), виведення виконавчих механізмів на режим холостого ходу (якщо їх конструкція передбачає перебування на холостому ході при штатному режимі роботи основної системи).

2) Пасивний режим (режим стеження, відповідає нормальному режимові роботи основної системи): датчики та обчислювальний блок (блоки) працюють у штатному режимі, здійснюється приймання та обробка сигналів. Але команди не генеруються, виконавчі механізми залишаються вимкненими, або на холостому ході, в залежності від конструкції.

3) Вмикання активного режиму ШРОУ (Відповідає початку нештатної роботи основної системи. Тут можливі два варіанти: або вихід параметрів пари за припустимі межі, умовно «вище» за потоком, аніж ШРОУ – або ж несправність чи інші проблеми споживачів пари умовно «нижче» ШРОУ за потоком. Наприклад, несправність турбогенератора). Система ШРОУ повинна обчислити параметри і сформувати командні сигнали, виконати необхідні підготовчі дії та надіслати командні сигнали виконавчим механізмам.

4) Активний режим ШРОУ: відбувається редукування тиску та зниження температури пари у контурі ШРОУ, датчики відстежують параметри в контурі ШРОУ, а також в основній системі, як вище, так і нижче за потоком від ШРОУ, обчислювальний блок керує роботою контуру ШРОУ і утримує параметри у

заданих межах, генеруючи та надсилаючи коригувальні командні сигнали, в разі потреби.

5) Завершення активного режиму ШРОУ (Відповідає поверненню основної системи у штатний режим). Генеруються і надсилаються відповідні командні сигнали, виконавчі механізми ШРОУ вимикаються, або переводяться на холостий хід.

6) Нештатний (аварійний) режим роботи самого ШРОУ: вимкнення живлення ШРОУ, несправність обчислювального блоку, відмова датчиків, несправність виконавчих механізмів у контурі ШРОУ, тощо. В залежності від характеру несправності, виконуватиметься відповідний аварійний алгоритм.

7) Штатне вимкнення системи: виконуються штатні дії по вимкненню робочих механізмів ШРОУ, запис статистики роботи у пам'ять обчислювального блоку ШРОУ, заключна самоперевірка системи ШРОУ, вимкнення живлення.

Вище система ШРОУ порівнювалася із запобіжним клапаном. Але слід зазначити їх принципову відмінність між собою. У клапані швидкість зміни потужності в часі не має суттєвого значення. Виконавчий механізм, тобто сам клапан, має спрацювати якнайшвидше. Надлишкова кількість пари має бути викинута у навколишнє середовище за найкоротший ас. Клапан має автоматично, або за командою зачинитися, коли надзвичайна ситуація мине — от і усі вимоги щодо динаміки. Але і в практиці предметної області, і у відповідній їй галузі прикладної науки є суттєва прогалина, що стосується динаміки перетворення енергії у ШРОУ. Власне, постановка даного питання і його рішення складає наукову новизну даної статті. Бо у ШРОУ відбувається не розсіювання (тобто втрата) надлишкової енергії, а її утилізація, з перетворенням на інший вид енергії. Але з точки зору запобігання аварійних ситуацій, градієнт збільшення/зменшення енергії має бути як найменшими при будь-якому способі утилізації енергії. Бажано, щоб сумарна потужність, генерована системою взагалі залишалася постійною. З іншого боку, реагування системи ШРОУ на аварійну ситуацію має бути якнайшвидшим. Але швидкодія обчислювального блоку має вкрай незначний вплив на загальний час реакції системи. обчислювальна компонента нині є вкрай дешевою (порівняно з механічною складовою системи). І немає перешкоди в тому, щоб застосувати більш продуктивний процесор і тим зменшити час реакції. Але механічна складова має значно більшу інертність. Час відкриття клапанів вимірюється десятими долями секунди. Якщо ж перетворення енергії для її подальшої утилізації здійснюється за допомогою якихось механічних пристроїв: впорскування води, пропускання струменя пари через вихрове водяне кільце, чи крізь парову турбіну — час реакції стає іще більшим. Ситуація іще погіршується тим, що будь-який пристрій утилізації енергії має технічні обмеження щодо швидкості зміни потужності в часі. Причому, як енергії, що входить у нього, так і вхідної, ним перетвореної енергії. Тобто енергію на утилізаційний пристрій слід подавати дозовано, поступово нарощуючи її величину так, щоб не перевищити технічні можливості останнього. Наприклад, турбіна, яка працює на номінальному режимі, може витримати раптове підвищення енергії вхідного потоку на 10%. Але якщо така сама, за абсолютною величиною, енергія потоку буде прикладена до турбіни на малих обертах, та може не витримати механічного навантаження і вийде з ладу. Треба підготувати систему впорскування оди, або розкрутити кільце з водою, або ж виконати стартове розкручування турбіни. Отже, від моменту отримання аварійного сигналу і до виходу контуру ШРОУ на максимальний режим потрібен час від кількох секунд до десятків секунд залежно від технічного виконання і параметрів системи. Можна стверджувати, що мінімально можливий час спрацювання механічних компонентів системи ШРОУ є на один, або кілька порядків вище, аніж максимально припустимий час реакції, який від неї вимагається за умовами експлуатації. Особливо критичною ситуація виглядає у атомній енергетиці, де процеси розвиваються за час у соті і навіть тисячні частки секунди. Причому проблема зберігається для несправностей та позаштатних режимів і “вище”, і “нижче” ШРОУ за потоком.

Очевидно, що класичними методами дана проблема не вирішується, отже потрібен якийсь новий підхід. Проаналізувавши загальну схему керування ШРОУ, ми бачимо що вона має яскраво виражений **реактивний** характер. Тобто, спочатку відбувається якась надзвичайна ситуація, і тільки після цього обчислювальний блок ШРОУ розпізнає цю ситуацію і її характер, генерує відповідні командні сигнали і надсилає їх на виконавчі механізми, які спрацьовують іще пізніше. Запізнення реакції системи тягне за собою негативні, а часом і катастрофічні наслідки. Єдиним рішенням тут може бути перехід від **реактивного** до **активного** керування системою. Тобто від керування **за наслідками** до керування **за прогнозом**. Фізично це може бути втілено в тому разі, коли найбільш тривалі підготовчі операції будуть розпочаті **до моменту настання аварійної ситуації**. За аналог цього узято відомий з іншої галузі спосіб [8]. Підґрунтям його є факт високих посадочних швидкостей сучасних літаків — приблизно 100 м/с. В момент торкання поверхні землі нерухоме, перед тим, колесо шасі отримує таку ж саму окружну швидкість. Це відбувається практично моментально, із вкрай малим запізненням, породженим тертям у підшипниках та механічною пружністю системи. З точки зору міцності це є рівнозначним до миттєвого прикладення до конструкції крутного моменту значної величини. (І є дуже близьким механічним аналогом до системи ШРОУ, яка є предметом даної статті). Щоб запобігти руйнуванню конструкції шасі, автори [8] та інших патентів на зазначену тему пропонують попереднє розкручування коліс. Тобто попереднього надання механічному пристроєві кінетичної енергії, співрозмірної за величиною тому потокові енергії, що буде подано на пристрій в момент настання надзвичайної ситуації (торкання земної поверхні у випадку з літаком). Дане технічне рішення можна вважати успішним, оскільки воно виключає поздовжню швидкість літака з чинників механічного впливу на конструкцію, залишаючи тільки вертикальну швидкість зниження,

яка є на порядок меншою. Тому, у вигляді прямого механічного аналогу (якщо у системі ШРОУ застосовуватиметься турбіна, чи інший накопичувач/перетворювач енергії), або непрямого аналогу (виконання інших дій по підготовці споживача до приймання надлишкової кількості енергії) принцип **випереджуючого виконання підготовчих дій** може бути рекомендований для системи ШРОУ.

Проте, під час втілення цього принципу в авіації, на відміну від системи ШРОУ, заздалегідь є відомим найсуттєвіший параметр: **момент часу** подання надлишкового потоку енергії. Який, у випадку з літаком, визначається польотним завданням та рішеннями командира повітряного судна про посадку. Тоді, як ШРОУ, за своїм призначенням, є системою для дії у надзвичайній (аварійній) ситуації. А подібні ситуації заздалегідь не програмуються і відбуваються у довільний момент часу. Проте, як відомо, аварійні ситуації поділяються на дві категорії: ті, що мають так званий **передвідмовний стан**, і такі, що його не мають. Під передвідмовним станом ми розуміємо такий стан системи, **який може бути виявлений існуючими датчиками та алгоритмами,** і при якому параметри робочого процесу і стан самої системи іще перебувають в припустимих межах, але динаміка зміни цих параметрів із достатнім ступенем імовірності вказує на можливість настання надзвичайної події (пошкодження/відмови/виходу параметрів за припустимі межі) у найближчому майбутньому. Ситуації без передвідмовного стану трапляються миттєво або ж їх передвідмовний стан є прихованим, з-за тієї чи іншої причини, і не може бути виявленим інструментально. Власне, різниця між цими видами подій є кількісною і визначається величиною проміжку часу до їх настання. Але вона тягне за собою якісну відмінність у алгоритмі роботи ШРОУ. Подія без передвідмовного стану вимагає застосування аварійного алгоритму роботи ШРОУ. Згідно з яким, перш за все, виконуються дії з запобігання аварії/катастрофи: відкриття аварійних клапанів тощо, змирившись із тим, що частина енергії при цьому буде втрачена незворотньо. Водночас розпочинається виконання підготовчих дій (але вже без випередження у часі, postfactum) та продовжується вимірювання енергетичних параметрів процесу. Коли останні знизяться до величини, припустимої для штатної роботи системи ШРОУ, розпочинається утилізація енергії.

У свою чергу, передвідмовні стани поділяються на такі, що можуть бути викриті власними інструментальними засобами системи ШРОУ, і такі, що можуть бути викриті зовнішніми засобами — з передачею отриманих параметрів до ШРОУ. Це викликано тим, що за своєю суттю ШРОУ є допоміжною системою. І навряд чи на неї буде покладено контроль основної системи (енергогенеруючої, хімічного виробництва, тощо). В даній статті припускається, що основна система оснащена власною системою самоконтролю та діагностики, здатною розпізнати передвідмовний стан конструкції і передати його параметри іншим споживачам. І природно, структура цілої системи може бути іншою. Наприклад,

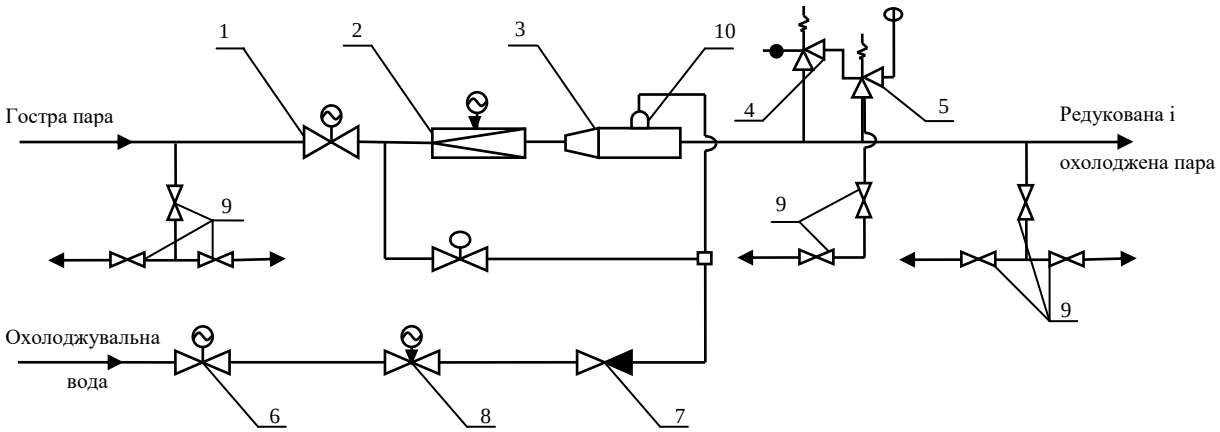


Рис. 1. Схема ШРОУ класичного типу:
1 – заслінка; 2 – клапан дросельний, 3 – охолоджувач пари; 4 – клапан імпульсний; 5 – ГПК, 6, 9 – клапани запирання 7 – клапан зворотній; 8 – клапан регулювальний. 10 – форсунка механічного розпилювання води [9]

інформаційний контур ШРОУ може не існувати, як окрема підсистема, а бути однією з функцій загальної системи керування. Проте різниця в даному випадку не є принциповою. Припустимо, що ШРОУ являє собою автономну підсистему. В такому випадку ШРОУ складатиметься з таких компонентів: обчислювальний блок, комплект датчиків, приводи виконавчих механізмів, канали інформаційного обміну з центральною системою керування та іншими підсистемами. Принципова схема ШРОУ показана на рис. 1.

Ключовим моментом у запропонованому рішенні є вибір раціонального алгоритму викриття передвімовного стану. Нині великої популярності набули різноманітні варіанти нейронних мереж. Але, при усіх їх перевагах, слід зазначити, що вони потребують значного часу на обчислення. Тоді, як в предметній області процеси є швидкоплинними, і затримка з реакцією на виникнення надзвичайної події може потягти за собою катастрофічні наслідки. Отже, за умовами практики предметної області, можуть застосовуватися виключно найпростіші алгоритми, що вимагають мінімуму часу на їх обчислення. Тут може бути втілений раціональний прийом, який широко застосовується у промисловій електроніці: складні функціональні залежності замінюються на найпростіші, лінійні. Складні й громіздкі в обчисленнях функції замінюються на відрізки прямих, які визначаються коефіцієнтом (тобто тангенсом кута нахилу) і зміщенням. Найголовнішим питанням, відповідь на яке складає наукову новизну даної статті, є математичне вираження моменту

настання передвідмовного стану.

Розглянемо передвідмовний стан системи. Його особливістю є те, що він являє собою перехідний процес із чітко вираженим закінченням: настання аварії/відмови/катастрофи — або зовнішнє втручання у процес, з усуненням причини, що викликала передвідмовний стан та з поверненням до штатного режиму роботи системи. Натомість, початок передвідмовного процесу є "розмитим" у часі. А причина, що його викликала, або взагалі не відображається у зміні поведінки та параметрів системи, або ці зміни важко відрізнити від їх флуктуацій у нормальному режимі роботи. Оскільки надзвичайні події і передвідмовні стани можуть мати різноманітну природу, для побудови алгоритму роботи ШРОУ необхідно звести їх до єдиного критерію. В якості такого пропонується **очікуваний час настання надзвичайної події**. Вище згадувалося, що передвідмовний технічний стан основної системи має визначатися її власними засобами самодіагностики — і передаватися до обчислювального блоку ШРОУ каналами інформаційного обміну. Це стосується як стану системи умовно "вище" ШРОУ, тобто енергогенеруючої складової (котла, реактора, тощо), так і споживачів енергії пари умовно "нижче" ШРОУ (паротурбінних агрегатів, тощо). Предметом даної статті є параметри робочого процесу, які вимірюються власними датчиками ШРОУ, тобто параметри потоку пари. Оскільки потенційна і кінетична енергія пари легко трансформуються одна в іншу і навпаки, визначальною є повна енергія, що є сумою потенційної і кінетичної енергій. Для її визначення достатньо вимірювати три параметри: температуру, парціальний тиск пари і швидкість потоку. Оскільки йдеться мова про динамічний процес, фізичною величиною має бути не енергія, як така, а секундний потік енергії через заданий переріз паропровода. Подією "відмова" тоді вважатиметься таке значення повної енергії $E_п$, яке дорівнює гранично припустимому значенню$E_{пр}$= E(V, T, P), що є верхньою межею нормального експлуатаційного діапазону, де V швидкість, T – температура, а $P_{пар}$ — парціальний тиск потоку газів. На кожному кроці часу мають обчислюватися такі параметри: різниця ΔE між гранично припустимим $E_{пр}$ і поточним $E_п(t_i)$ значеннями повної енергії потоку пари:

$$\Delta E=E_{ПР}-E_п(t_i), \tag{11}$$

Похідна функції повної енергії за часом, тобто швидкість зміни повної енергії обчислюється так:

$$E_п^{'}=\frac{dE_{пр}}{dt}\approx\frac{\Delta E_п}{\Delta t}=\frac{E_п(t_i)-E_п(t_{i-1})}{t_i-t_{i-1}} \tag{12}$$

Друга похідна функції повної енергії за часом:

$$E_п^{''}=\frac{dE_{пр}^{'}}{dt}\approx\frac{\Delta E_{пр}^{'}}{\Delta t}=\frac{E_п^{'}(t_i)-E_п^{'}(t_{i-1})}{t_i-t_{i-1}} \tag{13}$$

Енергетичний баланс обчислюється згідно з [10].

Для потоку насиченої пари повна енергія являє собою суму кінетичної енергії $E_к$, що визначається швидкістю та секундною витратою маси пари, потенційної енергії механічного тиску пари $E_р$ та тепловою енергією $E_т$, наданою парі в процесі її перегрівання.

Потік кінетичної енергії визначається загальновідомою формулою

$$E_k^{'}=\frac{V\rho V^2}{2S}E_k^{'}=\frac{V\rho V^2}{2S} \tag{14}$$

де V – швидкість потоку, ρ — густина пари, S – площа перетину каналу.

Потік потенційної енергії обчислюється, як

$$E_р^{'}=V\times p, \tag{15}$$

де p – парціальний тиск пари.

Теплота перегрівання пари $q_п$, тобто теплота, необхідна для переведення одиниці маси сухої насиченої пари у перегріту пару з температурою t при її ізобарному нагріванні обчислюється за формулою:

$$q_п=\int_{t_H}^{t}c_p\,dt=h-h'=u-ü+P(v-\ddot{v}) \tag{16}$$

де $c_р$ – масова ізобарна теплоємність перегрітої пари (змінна величина, що залежить від тиску і температури, визначається експериментально).

Далі перевіряємо знак другої похідної $E_п^{''}$ величини повної енергії. Якщо $E_п^{''}>0$, вважаємо, що надалі швидкість зміни повної енергії $E_п^{'}(t_i)=E_п^{''}(t_i)\times\Delta t$. Якщо ж $E_п^{''}<0$, вважаємо, що швидкість зміни повної енергії надалі залишається, як обчислено у [2].

І відповідно, критичний час $t_{КР}$ до моменту настання надзвичайної події обчислюється за формулою:

$$t_{кр}=\frac{\Delta E(t_i)}{E_п^{'}(t_i)} \tag{17}$$

Обчислене значення $t_{кр}$ порівнюється з мінімальним часом виконання підготовчих дій $t_{впд}$ що є технічною характеристикою ШРОУ. У випадку, якщо в момент часу $t_п$ обчислене значення $t_{кр}= t_{впд}+t_з$, де $t_з$ — обраний час запасу (заздалегідь визначений резерв часу на затримку з прийняттям рішення, тощо), цей момент часу вважатиметься моментом початку підготовчих дій. В момент $t_п$ система керування ШРОУ генерує командний сигнал виконавчим механізмам на запуск підготовчих дій (розкручування турбіни, підготовку до пуску води у потік пари, тощо). В залежності від обраного алгоритму. Одночасно сигнал про початок підготовчих дій надсилається по каналах інформаційного обміну до системи (систем) керування споживачами ШРОУ — в разі, якщо вони теж потребують виконання послідовності підготовчих дій перед прийняттям пари по каналу ШРОУ. Для запобігання ударних навантажень та стрибків потоку енергії вже в момент часу $t_п$ або ж у довільний момент часу $t = t_п + \tau$, де $\tau \le t_{впд}$, **тобто ще до настання надзвичайної події,** і відповідно до обраного алгоритму, може розпочатися байпасування пари через ШРОУ, з поступовим збільшенням потоку від нульового до максимального значення. Цим досягається те, що графік зміни енергії пари, яку отримує споживач ШРОУ, буде максимально пологим, і не призведе до аварійної ситуації у споживача. Водночас система керування ШРОУ продовжує відстежувати сигнали з основної системи та вимірювати параметри потоку [11]. У випадку, якщо з системи керування основною системою буде отримано сигнал про усунення причини, що викликала надзвичайну подію, система керування ШРОУ згенерує командні сигнали на виконання завершальних дій: плавне зменшення потоку пари через ШРОУ та вимкнення виконавчих механізмів ШРОУ (перекриття системи впорскування води, закриття клапанів тощо). Якщо система керування ШРОУ отримуватиме від датчиків вимірювання параметрів сигнали про стабілізацію таких параметрів у прийнятних межах протягом заздалегідь визначеного проміжку часу, система керування ШРОУ також згенерує командні сигнали на виконання вищезазначених завершальних дій. Гіпотетична функціональна схема ШРОУ зображена на рис. 2.

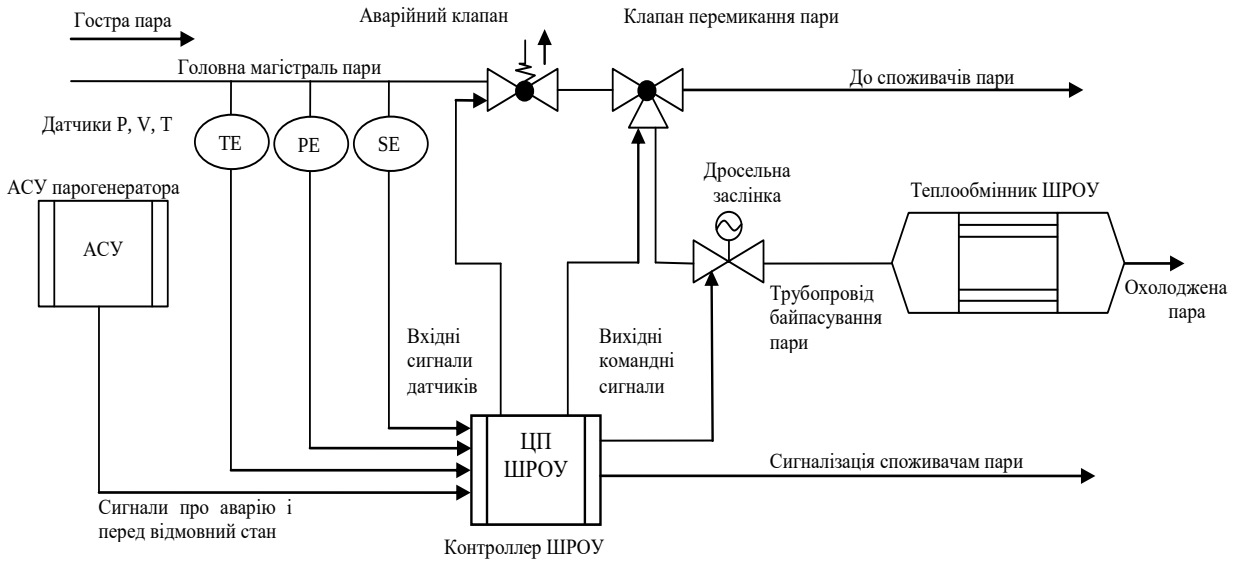


Рис. 2. Функціональна схема ШРОУ (варіант)

На схемі наведено головні компоненти ШРОУ та показано основні зв'язки між ними. АСУ парогенератора подає сигнали про аварію і передвідмовний стан на контролер, тим часом датчики з головної магістралі надсилають сигнали щодо температурної складової та тиску пари. У разі виникнення аварій ЦП ШРОУ надсилає сигнал на аварійний клапан про перекриття магістралі та на клапан перемикання пари для спрямування потоку пари на іншу лінію. Відкриття дросельної заслінки сприяє переходу нари по трубопроводу байпасування пари на теплообмінник ШРОУ звідки виходить охолоджена вода.

Запропонований алгоритм роботи ШРОУ відображений на рис. 3. На початку роботи ШРОУ здійснюється перевірка каналів інформаційного обміну із зовнішніми системами СУ генератора і споживачів пари, якщо сигнал про аварію підтверджено система подає командний сигнал на відкриття аварійних клапанів випуску пари. У разі негативної відповіді щодо аварії перевіряється система на передвідмовний стан, якщо є такий сигнал система подає інформаційний сигнал СУ споживачам пари про початок підготовчого циклу, у разі відсутності сигналу про передвідмовний стан здійснюється вимірювання P.T.V. потоку пари, обчислювання поточного значення $E_П(t_i)$, $E'_П(t_i)$, $E''_П(t_i)$. На основі отриманих значень перевіряється умова $E''_П(t_i)>0$ у разі ствердження приймаємо, що$E'_П(t_i)=E''_П(t_i)\times\Delta t$, за умови спростування приймаємо, що $E'_П(t_i)=E'_П(t_i)$. Таким чином отримуємо рівняння $t_{кр}=\Delta E(t_i)/E'_П t_i$ на основі отриманих значень перевіряємо умову $t_{KP} > t_{ВПД} + t_З\, t_{ВПД} + t_з$?, якщо умову підтверджено здійснюється кінець циклу. У разі заперечення подається інформаційний сигнал СУ споживачам пари про початок підготовчого циклу,

інформаційний сигнал СУ генератора пари про початок підготовчого циклу та здійснюється кінець циклу.

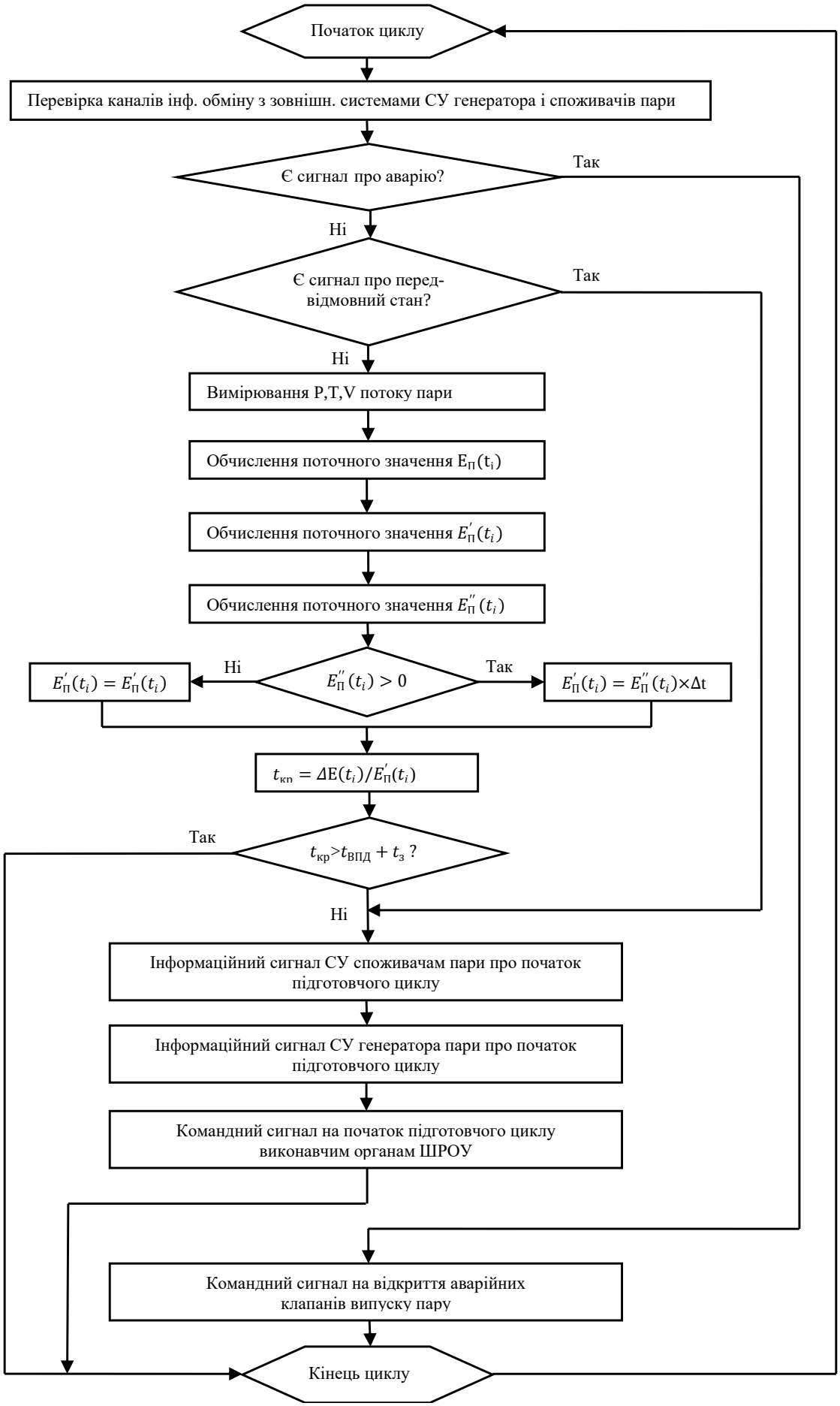


Рис. 3. Спрощений алгоритм роботи системи керування ШРОУ з випереджаючим прогнозом

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. У даній системі пропонується принципово нова стратегія керування системою швидкодіючою редукційно-охолоджувальною установкою, а також іншими технічними системами аналогічного призначення, від яких вимагається швидка реакція. А саме, пропонується замість **реактивного** керування, тобто керування postfactum, з генерацією командних сигналів **після** настання надзвичайної події, перейти до **активного** керування, тобто керування за **випереджуючим прогнозом.** Воно має ґрунтуватися на виявленні **передвідмовного стану** системи, який являє собою таку сукупність параметрів системи, що з певним ступенем імовірності свідчить про можливість настання надзвичайної події протягом заданого, кінцевого проміжку часу. В якості єдиного критерію визначення передвідмовного стану обрано повну енергію потоку пари, яка обчислюється за результатами вимірювань швидкості потоку, парціального тиску та температури перегрітої пари. В якості напрямків подальшого розвитку даної теми автор вбачає уточнення викладених алгоритмів та детальне дослідження взаємодії систем керування ШРОУ та основної (наприклад, енергогенеруючої) системи.

Література

1. Левадный В.А. Устройство для понижения давления и температуры пара / В.А. Левадный, В.Н. Сорокин, В.П. Кащеев // Труды международного семинара по конверсионной технике, Минск, 17–22 мая 1999 г. : в 2 ч. – Минск, 1999. – Ч. 1. – С. 312–315.

2. Имамова Л.М. О целесообразности замены редукционно-охладительной установки турбиной с целью повышения эффективности использования пара / Л.М. Имамова, Р.М. Саитов // Символ науки : Международный научный журнал. – 2016. – № 11-3. – С. 68–72.

3. Новиков С.И. Оптимизация автоматических систем регулирования тепло-энергетического оборудования / С.И. Новиков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – 108 с.

4. Новиков С.И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования / С.И. Новиков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 64 с.

5. Плетнёв Г.П. Автоматизация технологических роцессов и производств в теплоэнергетике / Г.П. Плетнёв. – 4-е изд., стереот. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с., ил.

6. Кулаков Г.Т. Комплексная методика оптимизации параметров динамической настройки регуляторов впрысков / Г.Т. Кулаков, М.Л. Горелышева // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений). – 2009. – № 3. – С. 59–66.

7. Нечипоренко О.В. Дослідження системи управління і захисту реактора атомних електростанцій / О.В. Нечипоренко, О.Я. Волошанюк / Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2019) : матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 6–8 листопада 2019 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро : Баланс-клуб, 2019. – С. 216–217.

8. Пат. 0002581996 Российская Федерация. Способ раскрутки-торможения колёс шасси / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин и др. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный авиационный технический университет". – № 216.015.342D ; опубл. 20.04.16.

9. Схема РОУ ЧЗЭМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8.

10. Буланин В.А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения / В.А. Буланин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 9. – С. 54–62.

11. Active Suppression of Low-frequency Interference Currents by Implementation of the High-performance Control System for the Grid-interfaced Converters. Nenad Težak, Ivan Bahun, Ivan Petrović. Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 199–214.

References

1. Levadnyj V.A. Ustrojstvo dlya ponizheniya davleniya i temperatury para / V.A. Levadnyj, V.N. Sorokin, V.P. Kasheev // Trudy mezhdunarodnogo seminara po konversionnoj tehnike, Minsk, 17–22 maya 1999 g. : v 2 ch. – Minsk, 1999. – Ch. 1. – S. 312–315.

2. Imamova L.M. O celesoobraznosti zameny redukcionno-ohladitelnoj ustanovki turbinoj s celyu povysheniya effektivnosti ispolzovaniya para / L.M. Imamova, R.M. Saitov // Simvol nauki : Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. – 2016. – № 11-3. – S. 68–72.

3. Novikov S.I. Optimizaciya avtomaticheskih sistem regulirovaniya teplo-energeticheskogo oborudovaniya / S.I. Novikov. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2006. – 108 s.

4. Novikov S.I. Prakticheskaya identifikaciya dinamicheskih harakteristik obektov upravleniya teploenergeticheskogo oborudovaniya / S.I. Novikov. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2004. – 64 s.

5. Pletnyov G.P. Avtomatizaciya tehnologicheskih processov i proizvodstv v teploenergetike / G.P. Pletnyov. – 4-e izd., stereot. – M. : Izdatelskij dom MEI, 2007. – 352 s., il.

6. Kulakov G.T. Kompleksnaya metodika optimizacii parametrov dinamicheskoj nastrojki regulyatorov vpryskov / G.T. Kulakov, M.L. Gorelysheva // Energetika… (Izv. vyssh. ucheb. zavedenij). – 2009. – № 3. – S. 59–66.

7. Nechyporenko O.V. Doslidzhennia systemy upravlinnia i zakhystu reaktora atomnykh elektrostantsii / O.V. Nechyporenko, O.Ia. Voloshaniuk / Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system (KMOSS-2019) : materialy V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi

konferentsii (m. Dnipro, 6–8 lystopada 2019 roku) / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Derzhavnyi vyshchyi navchalnyi zaklad «Ukrainskyi derzhavnyi khimiko-tekhnolohichnyi universytet». – Dnipro : Balans-klub, 2019. – S. 216–217.

8. Pat. 0002581996 Rossijskaya Federaciya. Sposob raskrutki-tormozheniya kolyos shassi / F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, V.I. Bekuzin i dr. ; zayavitel i patentoobladatel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovaniya "Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehnicheskij universitet". – № 216.015.342D ; opubl. 20.04.16.

9. Shema ROU ChZEM [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8.

10. Bulanin V.A. Algoritm analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya / V.A. Bulanin // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. – 2019. – № 9. – S. 54–62.

11. Active Suppression of Low-frequency Interference Currents by Implementation of the High-performance Control System for the Grid-interfaced Converters. Nenad Tezak, Ivan Bahun, Ivan Petrovic. Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 199–214.

Надійшла / Paper received : 07.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-213-218
УДК 528.563

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, Ю.В. КИРИЧУК, Н.М. НАЗАРЕНКО
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

СТРУКТУРНА СХЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ У П'ЄЗОЕЛЕМЕНТІ

В робота присвячена ефективності роботи авіаційної гравіметричної системи, що значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи - п'єзогравіметра, а саме перетворення та обробки сигналу прискорення сили тяжіння що знімається з чутливого елемента п'єзогравіметра. Розроблена структурну схему прямого перетворення сигналу із п'єзогравіметром для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Ключові слова: *п'єзогравіметр, п'єзоперетворювач, п'єзоелемент, прискорення сили тяжіння.*

O.M. BEZVESILNA, Y.V. KYRYCHUK, N.M. NAZARENKO
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

STRUCTURAL SCHEMATIC OF CONVERSION OF THE GRAVITY ACCELERATION SIGNAL IN A PIEZOELECTRIC ELEMENT

The paper considers operational efficiency of the airborne gravimetric system, which is largely ensured by the choice of the sensor element of the system represented by the piezogravimeter, namely the conversion and processing of the gravity acceleration signal received from the sensor element of the piezogravimeter. The structural schematic of conversion of the gravity acceleration signal in the piezoelectric element of a new two-channel piezogravimeter is considered and described, and a method of compensating the input voltage by introducing negative feedback based on the inverse piezoelectric effect is proposed. Based on the known design of the sensor element of the piezogravimeter, a structural schematic of the conversion of the input gravity acceleration signal from the sensor element to the output voltage of the piezogravimeter was constructed. For the analysis and research of this structural schematic, the transfer function was obtained for each circuit. The paper describes the functioning and the obtained transfer functions of all structural schematic circuits, namely: the circuit responsible for converting the gravity acceleration acting on the elastic element into a mechanical stress; the circuit responsible for converting the mechanical stress into a charge emerging on the electrodes of the piezoelectric element; the circuit responsible for converting the charge on the electrodes of the piezoelectric element into voltage; the circuit corresponding to the transfer characteristic of the voltage amplifier that behaves like a first-order lag. Due to the tendency of the piezoelectric element to discharge, a negative feedback loop was added to the direct signal conversion schematic. It has been found that that the inaccuracy of the piezogravimeter, as well as of all piezoelectric converters, largely depends on the stability of the piezoelectric modulus and the electromechanical coupling factor when affected by destabilizing agents. It has been found that by reducing the harmonic voltage at the output of a closed system, negative feedback linearizes the system reducing thereby frequency deviations.

Ключові слова: *piezogravimeter, piezoelectric converter, piezoelectric element, gravity acceleration.*

Точні знання аномалій гравітаційного поля Землі необхідні як у авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), так і в інших галузях науки і техніки - в геології, геофізиці, геодезії (розвідка корисних копалин, вивчення форми Землі тощо). Тому стає актуальним великомасштабне вивчення аномалій прискорення сили тяжіння (ПСТ).

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі може бути побудована авіаційну гравіметричну систему (АГС), чутливим елементом якої є гравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та меншими витратами, ніж за допомогою наземних морських або сухопутних гравіметричних засобів. Дані про гравітаційне поле Землі, введені у пам'ять бортової цифрової обчислювальної машини (ЦОМ) АГС, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів, так і ефективності гравіметричної розвідки.

Ефективність роботи АГС значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи - гравіметра. Сьогодні одними з перспективних вважають п'єзогравіметри. Побудова і дослідження АГС стало можливим завдяки розвитку і широкому застосуванню сучасних досягнень в області інерціальної навігації, прикладної теорії гіроскопів і гравіметрії.

У літературі [1–8] відсутні аналіз перетворення та обробки сигналу прискорення сили тяжіння що знімається з чутливого елемента п'єзогравіметра (ПГ). Тому метою даної роботи є надати такий аналіз та зробити необхідне дослідження.

Метою роботи є розробити структурну схему прямого перетворення сигналу із п'єзогравіметром (ПГ) для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння (ПСТ).

Будь-який засіб вимірювальної техніки, у тому числі й ПГ, прийнято розглядати як деякий перетворювач, що служить для перетворення вхідного сигналу у вихідний. У [8] розглянуто конструкцію нового ПГ, тому на її основі побудуємо структурну схему перетворення вхідного сигналу ПСТ у вихідну напругу ПГ (рис. 1). Аналіз даної схеми необхідний для визначення коефіцієнта $K_{ПГ}$ передачі ПГ [7].

У схемі, зображеній на рис. 1, ланці W_1 відповідає перетворення ПСТ g_z, що діє на ПЕ, у механічне напруження σ. Це механічне напруження чисельно рівне силі G, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу ПЕ. Якщо напруження постійне на всій площі перерізу ПЕ S, то $\sigma = G/S$, а тому:

$$W_1 = \frac{\sigma}{G} = \frac{G}{S}\frac{1}{G} = \frac{1}{S}. \quad (1)$$

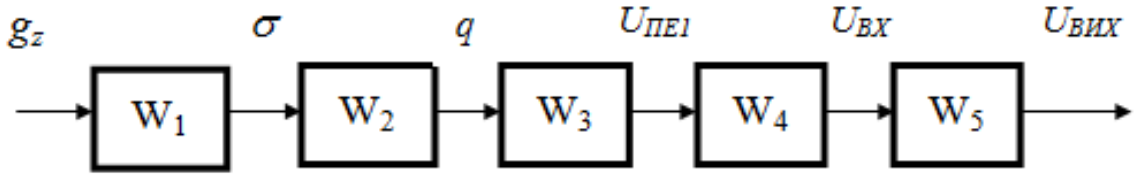


Рис. 1. Структурна схема прямого перетворення сигналу ПГ

Ланка W_2 відповідає перетворенню механічного напруження σ у заряд q на електродах п'єзоелемента (ПЕ):

$$W_2 = \frac{q}{\sigma} = \frac{d_y \sigma s}{\sigma} = d_y S \tag{2}$$

де d_{ij} – п'єзомодуль.

Ланка W_3 відповідає перетворення заряду q у напругу на електродах ПЕ. Перетворення даного типу відображає схема на рис. 2.

У відповідності до схеми на рис. 2 для струму I можна записати:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{U_{ПЕ}}{R_{ПЕ}} + C_{ПЕ}\frac{dU_{ПЕ}}{dt}. \tag{3}$$

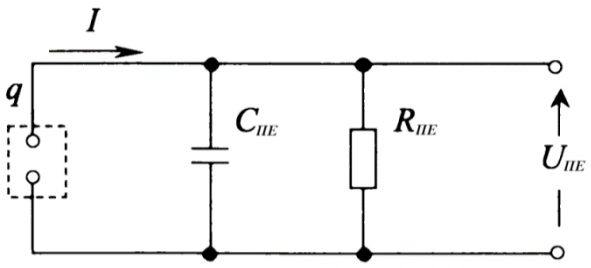


Рис.2. Еквівалентна схема перетворення ланки W_3

Якщо прийняти нульові початкові умови, то розв'язок диференційного рівняння матиме вигляд:

$$U_{ПЕ} = \frac{q}{\left(1 + \frac{1}{jwR_{ПЕ}C_{ПЕ}}\right)C_{ПЕ}}. \tag{4}$$

Звідси передатна функція буде дорівнювати:

$$W_3 = \frac{U_{ПЕ}}{q} = \frac{q}{q \cdot (1 + \frac{1}{jwR_{ПЕ}C_{ПЕ}})C_{ПЕ}} = \frac{1}{(1 + \frac{1}{jwR_{ПЕ}C_{ПЕ}})C_{ПЕ}}. \tag{5}$$

Однак, враховуючи велике значення $R_{ПЕ}$, можна прийняти:

$$W_3 = \frac{1}{C_{ПЕ}} \tag{6}$$

Ланка структурної схеми W_4 описує процес, який проходить при появі напруги на ПЕ (передача $U_{ПЕ}$ у коло $U_{ВХ}$). Її передатна функція відповідає передатній функції видозмінюючої диференціюючої ланки, схема якої представлена на рис. 3. Тут $R_{ВХ}$ – вхідний опір підсилювача напруги. Враховуючи великий опір ПЕ, вхідна частина підсилювача представлена лише опором $R_{ВХ}$.

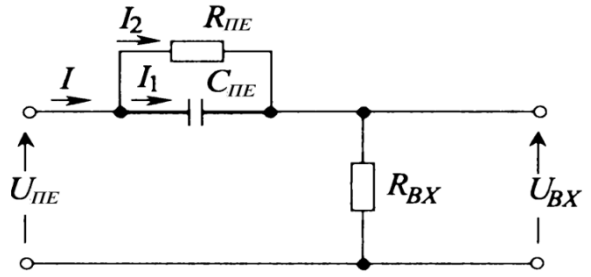


Рис. 3. Видозмінене диференціююче електричне коло

Для даної схеми можна записати:

$$U_{BX} = (I_1 + I_2) \cdot R_{BX}, \tag{7}$$

$$I_1 = C_{ПЕ} \frac{dU_{C_{ПЕ}}}{dt}, \tag{8}$$

$$I_2 = \frac{U_{C_{ПЕ}}}{R_{ПЕ}}. \tag{9}$$

Після підстановки (8-9) у (7) отримаємо:

$$U_{BX} = (C_{ПЕ} \frac{dU_{C_{ПЕ}}}{dt} + \frac{U_{C_{ПЕ}}}{R_{ПЕ}}) R_{BX}. \tag{10}$$

Відповідно до закону Кірхгофа, маємо:

$$U_{C_{ПЕ}} = I_2 R_{ПЕ} = U_{ПЕ} - U_{BX}. \tag{11}$$

Підставивши (11) у (10) отримаємо:

$$U_{BX} = C_{ПЕ} R_{BX} \frac{d(U_{ПЕ} - U_{BX})}{dt} + \frac{R_{BX}}{R_{ПЕ}} (U_{ПЕ} - U_{BX}). \tag{12}$$

Для подальших розрахунків введемо коефіцієнт:

$$\varepsilon_R = \frac{R_{ПЕ} + R_{BX}}{R_{BX}} \tag{13}$$

Поділимо вираз (12) на коефіцієнт ε_R :

$$\frac{U_{BX}}{\varepsilon_R} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} - \frac{C_{ПЕ} R_{BX}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} + \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{R_{BX}}{R_{ПЕ}} U_{ПЕ} - \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{R_{BX}}{R_{ПЕ}} U_{BX}. \tag{14}$$

Згрупуємо члени рівняння (13) та позбудемося знаменника $R_{ПЕ}$:

$$\frac{R_{ПЕ} U_{BX}}{\varepsilon_R} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}, \tag{15}$$

$$\frac{(R_{ПЕ} + R_{BX}) U_{BX}}{\varepsilon_R} + \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}, \tag{16}$$

$$R_{BX} U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}, \tag{17}$$

$$R_{BX} (U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt}) = R_{BX} (\frac{C_{ПЕ} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{1}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}), \tag{18}$$

$$U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_R} (C_{ПЕ} R_{ПЕ} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + U_{ПЕ}). \tag{19}$$

Позначимо постійну часу $\tau = R_{ПЕ} C_{ПЕ}$. Після підстановки постійної часу у рівняння (19) та введення оператора Лапласа, отримаємо:

$$(1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p) U_{BX} = \frac{1}{\varepsilon_R} (1 + \tau p) U_{ПЕ}. \tag{20}$$

Звідси передатна функція W_4 буде дорівнювати:

$$W_4(p) = \frac{U_{BX}}{U_{ПЕ}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}. \tag{21}$$

Ланка W_5 відповідає передатній характеристиці підсилювача напруги [7], яка поводить себе, як інерційна ланка першого порядку:

$$W_5(p) = \frac{K_{ОП}}{1 + p\tau_{ОП}}, \tag{22}$$

де $K_{ПО}$ – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача; $\tau_{ОП}$ – постійна часу.

Однак, враховуючи роботу перетворювача переважно у вузькому діапазоні частот, передатну характеристику можна прирівняти лише до коефіцієнта підсилення:

$$W_5 = K_{ОП}. \tag{23}$$

Отже, передатна функція $W_{пр}(p)$ сигналу у ПЕ матиме вигляд:

$$W_{пр}(p) = W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5 = d_{ij} \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1+\tau p}{1+\frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{ОП}. \tag{24}$$

Однак, ПЕ має схильність розряджатись, тому до схеми прямого перетворення сигналу необхідно додати контур від'ємного зворотного зв'язку. Схема п'єзоперетворювача матиме наступний вигляд (рис. 4) і буде складатись із ПЕ та підсилювача напруги. На ПЕ нанесені три електроди 1,2 та 3. Перший електрод підключений до входу підсилювача, другий – до загального проводу схеми, а третій, додатковий електрод, – до виходу підсилювача напруги.

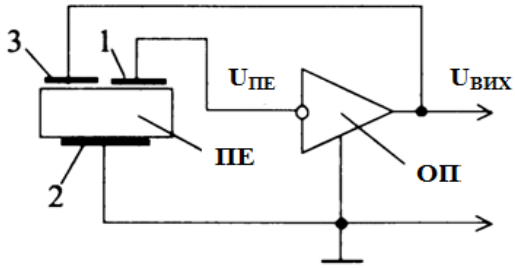


Рис. 4. ПГ зі зворотним від'ємним зв'язком: 1,2,3 – електроди; ОП – операційний підсилювач напруги; ПЕ – п'єзоелемент

Структурна схема такого п'єзоперетворювача показана на рис. 5.

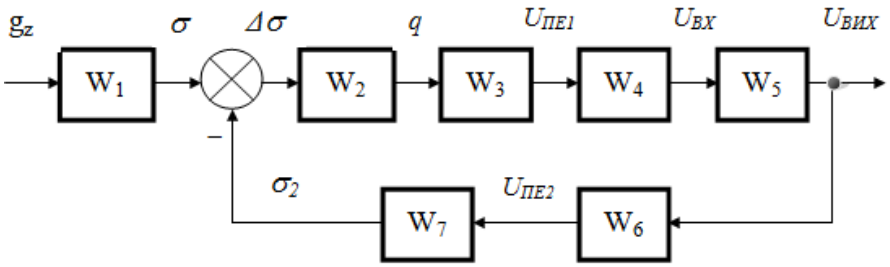


Рис. 5. Структурна схема ПГ з електромеханічним зворотним зв'язком

Ланка W_6 описує процес, який є оберненим до процесу ланки W_4 та проходить під час підведення напруги від підсилювача до додаткового електрода ПЕ. Еквівалентна схема цього процесу представлена на рис. 6. Тут $R_{ВИХ}$ – вихідний опір операційного підсилювача.

Розв'язуючи по аналогії до вирішення для ланки W_4, отримаємо:

$$W_6(p) = \frac{U_{ПЕ2}}{U_{ВИХ}} = \gamma_R \frac{(1+\frac{\tau}{\gamma_R} p)}{(1+\tau p)}, \tag{25}$$

де $\gamma_R = (R_{ПЕ} + R_{ВИХ}) / R_{ВИХ}$; $\tau = R_{ПЕ} C_{ПЕ}$.

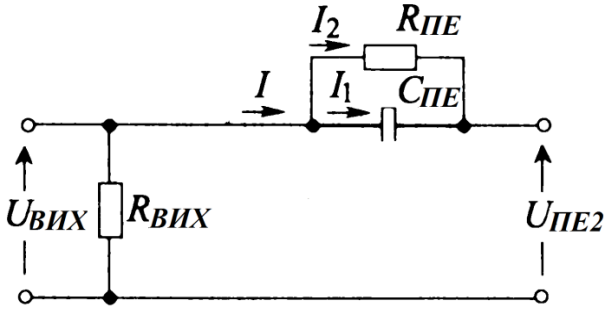


Рис. 6. Видозмінений диференціюючий ланцюг (ланка W_6)

Ланка W_7 відповідає перетворюванню напруги $U_{ПЕ2}$ у механічне напруження σ_2. Оскільки $\sigma_2 = Yd_{ij}U_{ПЕ2} / l$, то

$$W_7(p) = \frac{\sigma_2}{U_{ПЕ2}} = \frac{Yd_{ij}U_{ПЕ2}}{U_{ПЕ2} \cdot l} = \frac{Yd_{ij}}{l}, \tag{26}$$

де Y– модуль Юнга; l – довжина ПЕ [53].

Отже, коефіцієнт передачі $K_{ПГ}$ ПГ дорівнюватиме:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{W_1W_2W_3(p)W_4(p)W_5(p)}{1+W_2W_3(p)W_4(p)W_5(p)W_6(p)W_7} = W_1\frac{W(p)}{1+W(p)Z(p)}, \tag{37}$$

де W_1 – передатна функція, яка відповідає за перетворення сили $G \equiv m \cdot g_z$ у механічне напруження; $W(p)=W_2W_3(p)W_4(p)W_5(p)$ – коефіцієнт передачі ланцюга прямого перетворення ПСТ, охопленого від'ємним зворотним зв'язком; $Z(p)=W_6(p)W_7$ – коефіцієнт передачі ланцюга від'ємного зворотного зв'язку.

Підставивши всі значення часткових передатних функцій ПЕ у (37), отримаємо:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{1}{S}\left[\frac{d_{ij}S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R}\frac{1+\tau p}{1+\frac{\tau}{\varepsilon_R}p} \cdot K_{ОП}}{1+d_{ij}S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R}\frac{1+\tau p}{1+\frac{\tau}{\varepsilon_R}p} \cdot K_{ОП} \cdot \gamma_R \frac{(1+\frac{\tau}{\gamma_R}p)}{(1+\tau p)} \cdot \frac{Yd_{ij}}{l}}\right]. \tag{28}$$

Оскільки ланки W_4 та W_6 описують процеси, які є оберненими один до одного, то припустимо, що їх добуток буде приблизно дорівнювати одиниці, а формула (38) матиме вигляд:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{1}{S}\left[\frac{d_{ij}S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R}\frac{1+\tau p}{1+\frac{\tau}{\varepsilon_R}p} \cdot K_{ОП}}{1+d_{ij}S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot K_{ОП} \cdot \frac{Yd_{ij}}{l}}\right]. \tag{29}$$

Похибка ПГ, як і всіх п'єзоперетворювачів значною мірою залежить від стабільності п'єзомодуля та коефіцієнта електромеханічного зв'язку під впливом дестабілізуючих факторів. Тому, як показано у [8], для її мінімізації вводять наступну умову:

$$W(p) \cdot Z(p) \approx 1. \tag{30}$$

Із умови (30) видно, що добуток коефіцієнта передачі ланцюга прямого перетворення, охопленого від'ємним зворотним зв'язком, на коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку дорівнює одиниці. Це є принципіальною відмінністю нового ПГ від відомих вимірювальних систем, у яких дана умова має вигляд:

$$W(p) \cdot Z(p) \to \infty. \tag{31}$$

Однак на практиці добуток $W(p) \cdot Z(p)$ може дещо відрізнятись від одиниці, бо ці коефіцієнти залежать також від форми, розмірів та просторового розташування електродів, а також від утворених у каналах передачі п'єзоелемента додаткових електричних полів. Новий ПГ працює в області низьких частот, відповідно введений зворотний зв'язок, що є залежним від частоти. Таким чином, параметри зворотнього зв'язку можуть суттєво змінювати властивості ПГ, його частотні та перехідні характеристики, при цьому як

зменшуючи, так і збільшуючи його власну частоту. Оскільки власна частота ПГ повинна бути відносно низькою, рівною 0,1 рад/с, а добротність максимальною, тому підбираємо тільки параметри $R_{ВИХ}$ та $R_{ВХ}$ за відповідними критеріями.

Введення від'ємного зворотнього зв'язку суттєво впливає на нелінійні відхилення системи. Це можна показати по формулі:

$$U_{2k}^{*} = \frac{U_{2k}}{1+W(p)\cdot Z(p)}, \tag{32}$$

де U_{2k}^{*} – напруга відповідної гармоніки на виході перетворювача; U_{2k} – напруга відповідної гармоніки на вході перетворювача із від'ємним зворотнім зв'язком.

Таким чином, зменшуючи напругу гармонік на виході замкненої системи, від'ємний зворотній зв'язок лінеалізує систему, зменшуючи тим самим частотні відхилення.

Висновки

Розглянуто та описано структурну схему перетворення сигналу ПСТ у п'єзоелементі нового ДПГ та запропоновано спосіб компенсації вхідного напруження шляхом введення від'ємного зворотного зв'язку на основі зворотного п'єзоефекту. Визначено коефіцієнт передачі ПЕ, виготовленого із ніобату літію, який складає 1,682.

Література

1. Безвесільна О.М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів: підручник / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – 812 с.

2. Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. Пособие / В. В. Янчич. – Ростов-на-Дону, 2008. – 77 с.

3. Безвесільна, О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія / О. М. Безвесільна. –Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с.

4. Tkachuk, A. H. Corrected gyrocompass synthesis as asystem with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / A.H. Tkachuk, E.N. Bezvesilnaya // Aviation. –2014. –Vol. 18, Issue 3. –P. 134–140. doi: 10.3846/16487788.2014.9698785.

5. Безвесільна, О. М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів: монографія / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук, С. С. Ткаченко - Житомир: ЖДТУ, 2010. – 153 с.

6. Безвесільна, О. М. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем (Технологічні вимірювання та прилади): навчальний посібник для студентів приладобудівних спец. ВНЗ / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук; Житомир. держ. технол. ун-т.– Житомир: ЖДТУ, 2008.– 172с.

7. Безвесільна О.М. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин: Підручник / Безвесільна О.М., Тимчик Г.С., Подчашинський Ю.О. – Житомир: ЖДТУ, 2011.– 976 с.

8. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень / О. М. Безвесільна. – К.: Либідь, 2001. – 261 с.

References

1. Bezvesilna O.M. Tekhnologhichni vymirjuvannja ta prylady. Peretvorjujuchi prystroji pryladiv: pidruchnyk / O. M. Bezvesiljna, Gh. S. Tymchyk. - Zhytomyr: ZhDTU, 2012. - 812 s.

2. Janchych V.V. Pj'ezoэlektrycheskye datchyky vybracyonnogho y udarnogho uskorenyja: Ucheb. Posobye / V. V. Janchych. – Rostov-na-Donu, 2008. – 77 s.

3. Bezvesiljna, O. M. Aviacijni ghravimetrychni systemy ta ghravimetry: Monoghrafija / O. M. Bezvesiljna. –Zhytomyr: ZhDTU, 2007. – 604 s.

4. Tkachuk, A. H. Corrected gyrocompass synthesis as asystem with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / A.H. Tkachuk, E.N. Bezvesilnaya // Aviation. –2014. –Vol. 18, Issue 3. –R. 134–140. doi: 10.3846/16487788.2014.9698785.

5. Bezvesiljna, O. M. Systemy keruvannja navighacijnykh system rukhomykh ob'jektiv: monoghrafija / O. M. Bezvesiljna, Ju. V. Kyrychuk, S. S. Tkachenko - Zhytomyr: ZhDTU, 2010. – 153 s.

6. Bezvesiljna, O. M. Peretvorjujuchi prystroji pryladiv ta komp'juteryzovanykh system (Tekhnologhichni vymirjuvannja ta prylady): navchaljnyj posibnyk dlja studentiv pryladobudivnykh spec. VNZ / O. M. Bezvesiljna, Ju. V. Kyrychuk; Zhytomyr. derzh. tekhnol. un-t.– Zhytomyr: ZhDTU, 2008.– 172s.

7. Bezvesiljna O.M. Naukovi doslidzhennja v ghaluzi vymirjuvannja mekhanichnykh velychyn: Pidruchnyk / Bezvesiljna O.M., Tymchyk Gh.S., Podchashynsjkyj Ju.O. - Zhytomyr: ZhDTU, 2011. - 976 s.

8. Bezvesiljna O.M. Vymirjuvannja pryskorenj / O. M. Bezvesiljna. – K.: Lybidj, 2001. – 261 s.

Надійшла / Paper received : 20.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-219-222
УДК 621.313

В.Д. КОСЕНКОВ
Хмельницький національний університет
Д.А. ІВЛЄВ
Одеський національний політехнічний університет

КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ ДЛЯ ВИСОКИХ І НИЗЬКИХ ШВИДКОСТЕЙ ОБЕРТАННЯ

Для будь-якої електричної машини основними є два показники: мінімум маси й максимум ККД. Для високообертових *і* низькообертових *машин постійного струму з безобмотковим ротором ці два показники досягаються різними засобами. У першому випадку цільний статор із загальним ярмом і сегментований ротор. У другому випадку – сегментований статор і цільний ротор. Завдяки такому підходу досягається значне поліпшення ряду питомих показників і зниження витрат електричної енергії в статичних і динамічних режимах роботи електропривода.*

Ключові слова: *ротор, статор, обмотка, магнітна система,* втрати в сталі*.*

V.D. KOSENKOV
Khmelnytskyi National University
D.A. IVLEV
Odesa National Polytechnic University

DC ELECTRIC MACHINES CONSTRUCTIONS WITH A WINDLESS ROTOR FOR HIGH AND LOW ROTATION SPEEDS

For any electric machine, the main two indicators are minimum mass and maximum efficiency. For high-speed and low-speed DC machines with the windless rotor, these two values are achieved in different ways. In the first case, a one-piece stator with a common yoke and a segmented winding-free rotor. In the second case, a segmented stator and a one-piece rotor. Thanks to this approach, a significant improvement in a number of specific indicators and a decrease in the consumption of electrical energy in static and dynamic modes of operation of the electric drive are achieved.

Keywords: *rotor, stator, armature winding, magnetic system, iron losses.*

Постановка проблеми

Поява на електротехнічному ринку високоенергетичних постійних магнітів NdFeB, запатентованих в 1983 р. Sumitomo Special Metals [1], призвело до значних змін в електротехнічній галузі. Сьогодні застосування магнітоелектричного збудження у двигунах регульованого приводу де-факто стало стандартом.

Однак в останні роки інтерес до електричних машин з електромагнітним збудження знову став відроджуватися. Синхронні реактивні двигуни, вентильно-індукторні двигуни, в конструкціях яких не використовуються постійні магніти, активно розбудовують такі гіганти як Siemens і ABB [2, 3].

Багато в чому така зацікавленність пояснюється високою вартістю постійних магнітів, яка за оцінками експертів, становить від 30 до 60% усієї вартості активних матеріалів електродвигуна [4, 5]. За рядом прогнозів [6, 7] очікується, що в найближчі роки вартість постійних магнітів буде тільки зростати.

На жаль, у якості електричних машин з електромагнітним збудженням сьогодні розглядаються лише різновиди синхронних машин, класичні машини постійного струму в цей список не входять. Класична машина постійного струму має декілька переваг: забезпечення постійного моменту в широкому діапазоні швидкостей; висока перевантажувальна здатність; просте реостатне регулювання; широкі можливості по регулюванню збудження (паралельне, послідовне); можливість живлення від мережі змінного струму з дешевою схемою регулювання на базі тиристорного випрямляча. На жаль, вона має і ряд недоліків: наявність ненадійного колекторного вузла, висока вартість, велика маса активних матеріалів не дозволяють їй зайняти гідне місце серед сучасних високотехнологічних електричних машин. Нова конструкція машини постійного струму дозволяє розв'язати цю проблему.

Основні результати

Електрична машина постійного струму з безобмотковим ротором (ЕМПСБР) вдало сполучає в собі гідності, як синхронних машин, так і машин постійного струму.

Магнітна система одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим сегментованим ротором (рис. 1) [8] складеться з корпусу 1, пакета статора 2, обмотки якоря 3, обмотки збудження 4, сегментованих полюсів 5, немагнітної втулки ротора 6 та валу 7.

Магнітна система бііндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим статором (рис. 2) [9] не має спільного ярма і складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців Ш – подібної форми 1, між якими укладено секції обмотки якоря 2, обмоток збудження 3, безобмоткових полюсів 4 і немагнітних дисків 5.

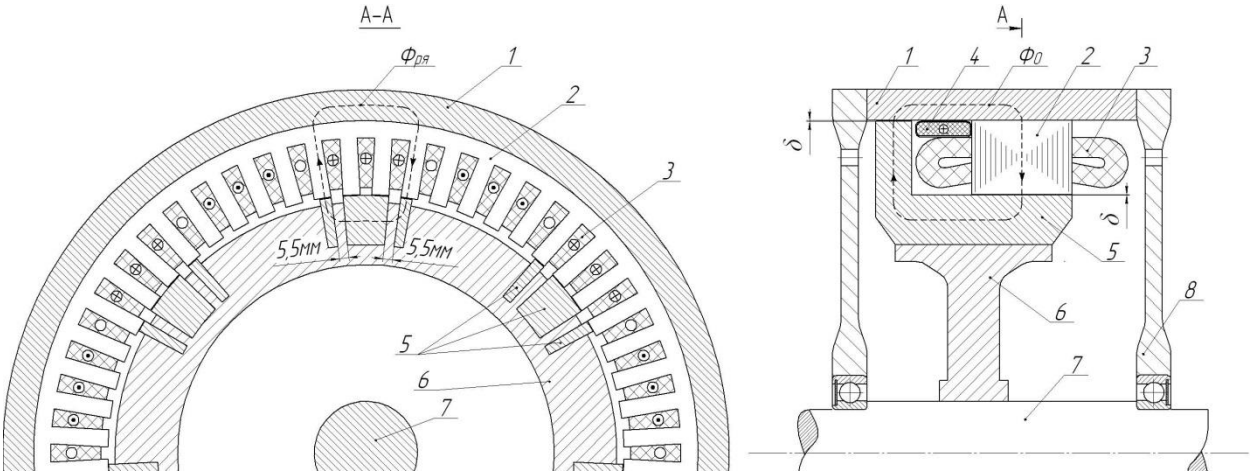


Рис. 1. Конструкція одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим ротором

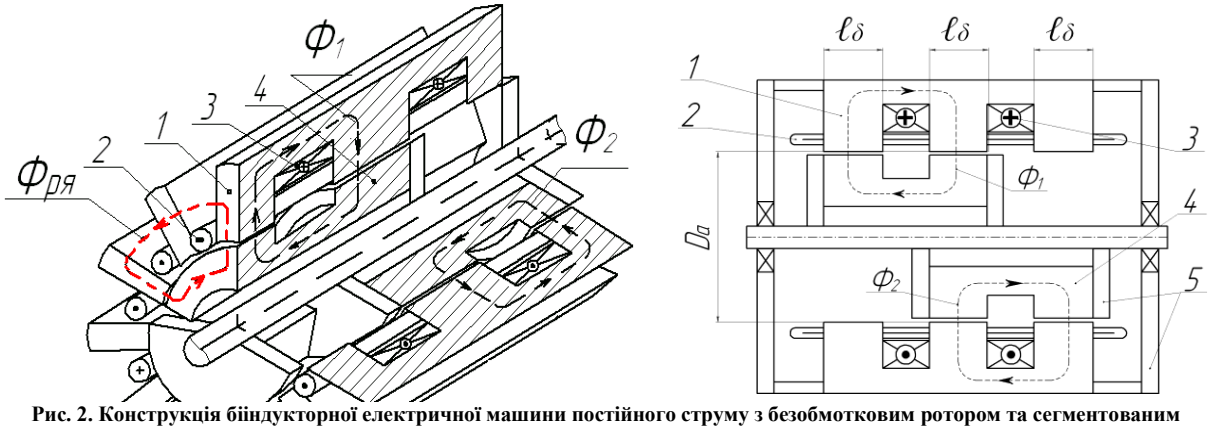
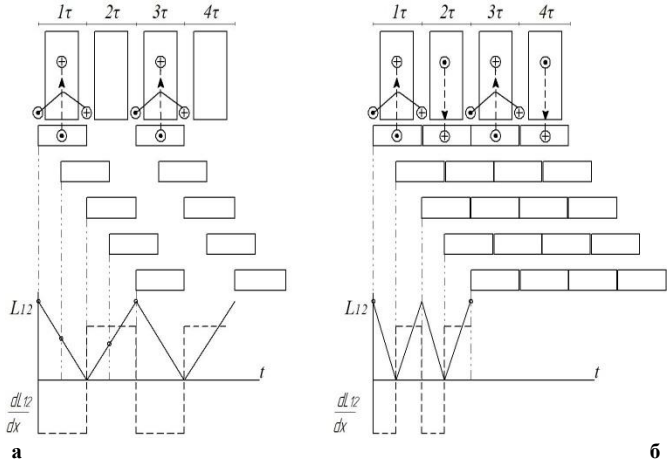


Рис. 2. Конструкція бііндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим статором

Наявність відкритих з обох боків пазів між зубцями статора (рис. 2) або сегментованого ротора (рис. 1) створює ряд повітряних проміжків, що призводить до зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, що, у свою чергу, призводить до послаблення поля реакції якоря $Ф_{ря}$ і відмови від додаткових полюсів та компенсаційної обмотки.

У ЕМПСБР обох конструкції всі обмотки нерухомі, а зміна магнітного потоку, що пронизує обмотку якоря, відбувається за рахунок переміщення феромагнітних полюсів безобмоткового ротора (рис. 3).



а **б**

Рис. 3. Зміна потокозчеплення в часі в одноіндукторної та бііндукторної ЕМПСБР

У ЕМПСБР, як і в індукторній машині, величина магнітної індукції в робочому проміжку змінюється тільки за величиною, залишаючись незмінною за напрямком. Це дозволяє вважати ЕМПСБР обох конструкцій машинами постійного струму індукторного типу. Як і у індукторній електричній машині, у ЕМПСБР лише частка обмотки якоря приймає участь у перетворенні енергії.

У одноіндукторному варіанті ЕМПСБР у перетворенні енергії приймає участь 50% обмотки якоря при частоті перемагнічування $f=V/(2\cdot\tau)$ (рис. 3,а). У бііндукторному варіанті ЕМПСБР у перетворенні енергії приймає участь 66% обмотки якоря, але при цьому під центральним зубцем частота перемагнічування

подвоюється $f=V/\cdot\tau$ (рис. 3,б).

Відмінність по частоті перемагнічування й визначає використання даних конструкцій для високих і низьких швидкостей обертання.

У теперішній час електричні машини розбудовують за двома напрямками:

- збільшення номінальної швидкості обертання двигуна, а, отже, зменшення габаритів електричної машини й збільшення її ККД;

- зменшення номінальної швидкості обертання двигуна при відмові від використання редуктора, тобто, створення високомоментних безредукторних електричних машин з ККД більше, ніж загальний ККД редуктора й двигуна.

Прикладом застосування високообертових електричних машин може служити будування електромобілів, де вже сьогодні номінальна швидкість обертання двигуна дорівнює 4000-5000 об/хв, а максимальна швидкість обертання при розгоні по трасі 12000-14000 об/хв [10]. У найближчій перспективі досягнення максимальної швидкості обертання 30000 об/хв.

Як відомо, максимальна швидкість обертання електричної машини обмежено двома факторами: механічною міцністю ротора й зростаючими втратами в сталі. Статор високошвидкісної електричної машини повинен витримувати великі зусилля на скручування, тому він має бути цільним, мати відносно невелику масу й величину втрат у сталі.

Конструкція одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим ротором повністю відповідає цим критеріям (рис. 1). Оскільки ЕМПСБР є машиною індукторного типу, то величина й напрямок магнітного потоку в корпусі й полюсах ротора (рис. 1 поз.1, 5), залишається незмінною, тому вони можуть виготовлятися зі звичайної конструкційної сталі. У даній конструкції перемагнічується тільки пакет статора, який має відносно невеликі масу й обсяг і збирається з листів електротехнічної сталі малої ширини 0,05 або 0,08 мм.

Порівняльні розрахунки ЕМПСБР із електромагнітним збудженням $P_н$=84кВт, $n_н$=4000об/хв, $U_н$=500В з аналогічним синхронним реактивним двигуном з підмагнічуванням(СРДП) [11] показав менший ККД ЕМПСБР =94,1% проти КПД СРДП = 96,2%, різниця 2%, але при цьому вартість активних матеріалів ЕМПСБР=109,7 євро, СРДП =195,5 євро, різниця 44%.

Конструкція бііндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим статором призначена для малих швидкостей обертання. Мала швидкість, малі втрати в сталі, малі тангенціальні навантаження на окремі зубці, що дозволяє застосувати сегментований статор, при цьому в перетворенні енергії приймає участь не 50, а 66 % обмотки якоря, що позитивно позначається на габаритах машини.

Порівняльні розрахунки ЕМПСБР із електромагнітним збудженням $P_н$=1кВт, $n_н$=600об/хв, $U_н$=300В з аналогічним синхронним генератором з постійними магнітами (СГПМ) [12] показав більшу ефективність ЕМПСБР - 1472кВт·г проти ефективності СГПМ 1213кВт·г, різниця 18%, але при цьому вартість ЕМПСБР=1150$, СГПМ =2800$, різниця 59%.

Висновки

Розглянуті електричні машини можуть ефективно використовуватися як у високообертових, так і в низькообертових механізмах, дозволяючи повністю реалізувати всі позитивні переваги класичних машин постійного струму.

Література

1. Matsuura Y., Sagawa M. et al., “Process for producing permanentmagnetmaterials,” US Patent 4,597,938, 1986.

2. The innovative synchronous-reluctance drive system with SIMOTICS motors and SINAMICS converters. Siemens. 2019. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:464e5706-2c00-469a-bbc3-079caefb6530/pdld-b10002-03simoticsreluktanzmotorenus-72.pdf.

3. IE4 SynRM motor-drive packages Super premium efficiency for industry. ABB. 2018. URL: https://library.e.abb.com/public/1deacbd313d443268fd50804b6abbe16/EN_IE4_SynRM_brochure_3AUA0000132610_RevG.pdf.

4. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. IEEE. 2010. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5618318.

5. Widmer J. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. J. Widmer, R. Martin, M. Kimiabeigi. Sustainable Materials and Technologies. 2015. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032.

6. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (Free Report). Adamas Intelligence. 2019. URL: https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/.

7. Dominique G. Rare earth elements and high-tech products. Guyonnet Dominique. CEC4Europe. 2018. URL: https://www.cec4europe.eu/wpcontent/uploads/2018/09/Chapter_3_3_Guyonnet_et_al_Rare_earth_elements_and_high_tech_products.pdf.

8. Патент України № 116924, Україна, МПК(2006.01) H02K 1/8, H02K 1/24, H02K 29/06, H02K 19/06. Електрична машина бііндукторного типу (варіанти) / В. В. Булгар, А. О. Бойко, А. Д. Івлєв, Д. А. Івлєв, О. В.

Яковлев, В. Д. Косенков. – a201606821, заявл.22.06.2016 ; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10.

9. Патент України № 104943, Україна, МПК(2006.01) H02K29/06. Електрична машина бііндукторного типу / О. А. Андрющенко, В. В. Булгар, А. О. Бойко, А. Д. Івлєв, Д. А. Івлєв, О. В. Яковлев, В. Д. Косенков. – a201211580, заявл.08.10.2012 ; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

10. Bulent S., Casey M., Han Di, Silong Li Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. researchgate. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/300415557_Benchmarking_of_electric_and_hybrid_vehicle_electric_machines_power_electronics_and_batteries.

11. Marco V. High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets. – 2018. URL: http://www.refreedrive.eu/wpcontent/downloads/2018_WMM_Paper_UNIVAQ.pdf.

12. Івлєв Д.А. Низькошвидкісний генератор постійного струму з безобмотковим ротором для вітроенергетичної установки : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.01 "Електричні машини і апарати" / Івлєв Дмитро Анатолійович – Одеса, 2019. – 21 с.

References

1. Matsuura Y., Sagawa M. et al., “Process for producing permanentmagnetmaterials,” US Patent 4,597,938, 1986.

2. The innovative synchronous-reluctance drive system with SIMOTICS motors and SINAMICS converters. Siemens. 2019. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:464e5706-2c00-469a-bbc3-079caefb6530/pdld-b10002-03simoticsreluktanzmotorenus-72.pdf.

3. IE4 SynRM motor-drive packages Super premium efficiency for industry. ABB. 2018. URL: https://library.e.abb.com/public/1deacbd313d443268fd50804b6abbe16/EN_IE4_SynRM_brochure_3AUA0000132610_RevG.pdf.

4. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. IEEE. 2010. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5618318.

5. Widmer J. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. J. Widmer, R. Martin, M. Kimiabeigi. Sustainable Materials and Technologies. 2015. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032.

6. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (Free Report). Adamas Intelligence. 2019. URL: https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/.

7. Dominique G. Rare earth elements and high-tech products. Guyonnet Dominique. CEC4Europe. 2018. URL: https://www.cec4europe.eu/wpcontent/uploads/2018/09/Chapter_3_3_Guyonnet_et_al_Rare_earth_elements_and_high_tech_products.pdf.

8. Patent Ukrainy № 116924, Ukraina, MPK(2006.01) N02K 1/8, N02K 1/24, N02K 29/06, N02K 19/06. Elektrychna mashyna biinduktornoho typu (varianty) / V. V. Bulhar, A. O. Boiko, A. D. Ivliev, D. A. Ivliev, O. V. Yakovlev, V. D. Kosenkov. – a201606821, zaiavl.22.06.2016 ; opubl. 25.05.2018, Biul. № 10.

9. Patent Ukrainy № 104943, Ukraina, MPK(2006.01) N02K29/06. Elektrychna mashyna biinduktornoho typu / O. A. Andriushchenko, V. V. Bulhar, A. O. Boiko, A. D. Ivliev, D. A. Ivliev, O. V. Yakovlev, V. D. Kosenkov. – a201211580, zaiavl.08.10.2012 ; opubl. 25.03.2014, Biul. № 6.

10. Bulent S., Casey M., Han Di, Silong Li Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. researchgate. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/300415557_Benchmarking_of_electric_and_hybrid_vehicle_electric_machines_power_electronics_and_batteries.

11. Marco V. High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets. – 2018. URL: http://www.refreedrive.eu/wpcontent/downloads/2018_WMM_Paper_UNIVAQ.pdf.

12. Ivliev D.A. Nyzkoshvydkisnyi henerator postiinoho strumu z bezobmotkovym rotorom dlia vitroenerhetychnoi ustanovky : avtoref. dys. na zdobuttia stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.09.01 "Elektrychni mashyny i aparaty" / Ivliev Dmytro Anatoliiovych – Odesa, 2019. – 21 s.

Надійшла / Paper received : 13.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-223-226
УДК 621.314

Ю.В. БАТИГІН, Т.В. ГАВРИЛОВА, Є.О. ЧАПЛИГІН, С.О. ШИНДЕРУК
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В роботі обґрунтована принципова дієвість резонансного підсилювача електричної потужності, заснована на висновках узагальненого теоретичного аналізу і експериментах, виконаних для розробленої моделі підсилювача. Результати цієї роботи необхідні для проектування електротехнічних пристроїв з резонансними компонентами.

Ключові слова: резонанс напруги, індуктивність, трансформатор Тесла, електрична потужність, коефіцієнт трансформації.

YU.V. BATYGIN, T.V. GAVRILOVA, YE.O. CHAPLYHIN, S.A. SHINDERUK
Kharkiv National Automobile and Highway University

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF RESONANCE AMPLIFIER OF ELECTRICAL POWER

An urgent task today is the search for opportunities for energy conversion, especially if it is associated with resonance effects, which, for example, can enhance the power of electrical signals. A prospective study consists in considering the processes in a device in which, with a sufficiently small active resistance in the secondary circuit, resonantly connected circuits should have an increase in electrical power. The generalizations of the results of the author's research, including theoretical analysis and experiments aimed at substantiating the fundamental possibility of resonant amplification of the power of harmonic signals in the circuit of two real inductively coupled series active-reactive circuits, where the inductance of the secondary circuit is the "output" element, are presented. A resonant electric power amplifier consisting of input and output RLC circuits using a transformer and characterized by the exact fulfilment of resonance conditions in the circuits is considered. For the theoretical analysis of electromagnetic processes, methods based on the theoretical principles of electrical engineering, in particular the theory of circuits, were used. The obtained theoretical and experimental results illustrate the real possibilities of a multiple increase in power (~ 35 … 37.8 times) in the adopted scheme of a resonant converter of electromagnetic energy based on the idea of a Tesla transformer. Comparison of the values of theoretical and experimental characteristics of the investigated amplifier showed their very good agreement at the level of 3 … 9%. On the basis of the conclusions of the generalized theoretical analysis and experiments carried out for the developed amplifier model, the fundamental efficiency of the resonant electric power amplifier is substantiated. The results of this work are necessary for the design of electrical devices with resonant elements.

Keywords: voltage resonance, inductance, Tesla transformer, electrical power, transformation factor.

Постановка проблеми

Явище резонансу відомо науковій спільноті з давніх часів. Стрімке зростання амплітуди змушених коливань системи, яке настає під час наближення частоти зовнішньої дії до певних значень (резонансних частот), обумовлених властивостями системи, спостерігається в механіці, електроніці, оптиці, акустиці, астрофізиці. Найбільш яскравими негативними проявами явища резонансу є механічні руйнування мостів, наприклад, Бротонського підвісного моста через ріку Ірвелл в Англії1 у 1831 році, коли по ньому йшов військовий загін; Єгипетського моста через ріку Фонтанку в Петербурзі у 1905 році в результаті проходження кавалерійського ескадрону церемоніальним маршем [1, 2] та інші. Гіркий досвід таких катастроф навчив військовослужбовців у подібних ситуаціях "збивати ногу" і йти не стройовим, а вільним кроком.

Виходячи з причинно-наслідкового зв'язку явищ природи, в першу чергу, виникає питання про причини руйнувань. Так, при збігу частот церемоніального маршу і власних коливань мостових опор динамічна енергія зовнішнього силового впливу різко зростає і суттєво перевищує її статичну величину, обумовлену загальною вагою ескадрону і ударами копит. Не задаючись питанням про фізичне джерело резонансної енергії, яка зруйнувала міст, не можна не відзначити безпрецедентні можливості практичного використання даного явища в різних областях сучасної науки і техніки. На користь такого висновку свідчить і фізичний принцип подібності, що дозволяє зв'язати просторові і часові характеристики процесів різної природи, відволікаючись від їх конкретного змісту [3].

Аналіз останніх джерел

Найбільш ефективну пропозицію використання резонансної енергії з коефіцієнтом перетворення більш ніж в ~ 1000 разів було запатентовано ще на початку минулого століття і названо по імені його винахідника «трансформатором Тесла» [4]. Останній, принципово, складається з двох резонансних контурів з індуктивним зв'язком і працює виключно як «над» підсилювач напруги (але не електричної потужності). Дослідженням трансформатора Тесла присвячено безліч публікацій. Як приклад, можна назвати роботу [5], відмінною рисою якої є пропозиція відповідної фізико-математичної моделі для теоретичного аналізу процесів, що протікають, спрямованого на підтвердження експериментальних висновків самого Н. Тесла і отримання чисельних оцінок амплітуд вихідної напруги при варіації робочих частот щодо резонансного значення.

Якщо трансформатор Тесла доповнити послідовним включенням зосередженої ємності в ланцюг вторинної обмотки, то отримана схема з двох активно-реактивних контурів з індуктивним зв'язком в режимі «резонансу напруги» може являти собою вже перетворювач з можливостями посилення не тільки по

напрузі, але і по току. Процеси в схемі ідеалізованого варіанту такого пристрою проаналізовані авторами видання [6], де було показано, що при досить малому активному опорі у вторинному контурі повинно мати місце посилення електричної потужності.

Авторами робіт [7–9] запропонована реальна схема резонансного підсилювача електричної потужності без ідеалізацій, прийнятих в [6]. Так, в публікації [7] представлені отримані аналітичні залежності для збуджених струмів і напруги. Авторами роботи [8] виконаний аналіз процесів, що протікають. В [9] описані експерименти, спрямовані на обґрунтування практичної дієздатності запропонованого підсилювача електричної потужності. Цитовані роботи висвітлюють окремі сторони проблеми і вимагають свого узагальнення в рамках окремої публікації.

Метою роботи є: узагальнення результатів авторських досліджень, що включає теоретичний аналіз і експерименти, спрямовані на обґрунтування принципової можливості резонансного підсилення потужності гармонічних сигналів в схемі з двох реальних індуктивно зв'язаних послідовних активно-реактивних контурів, де «вихідним» елементом є індуктивність вторинного контуру.

Виклад основного матеріалу

Виклад матеріалу проведемо в паралельному зіставленні формул і висновків теоретичного аналізу, чисельних оцінок для експериментальної моделі резонансного підсилювача і відповідних результатів вимірювань, детально освітлених в кожній з авторських робіт [7–9]. Принципова схема і експериментальна модель резонансного підсилювача представлена на рис. 1. Наведемо аналітичні залежності для струмів, напруги і потужності в режимі максимального струму в другому контурі і максимуму «вихідної потужності» [7, 8]:

$$\begin{cases} I_{1m} = \dfrac{E}{2R_1};\ U_{L_{1T}m} = E \cdot \dfrac{Q_1}{2};\ P_{1m} = \dfrac{E^2}{2R_1}; \\ I_{2m} = \dfrac{E}{2 \cdot \sqrt{R_2 \cdot R_1}};\ U_{L_2 m} = E \cdot \dfrac{(\omega \cdot L_2)}{2 \cdot \sqrt{R_2 \cdot R_1}};\ P_{2m} = \dfrac{E^2}{\sqrt{R_2 \cdot R_1}} \cdot \dfrac{Q_1}{4}; \end{cases} \quad (1)$$

де $I_{1m}, U_{L_{1T}m}, P_{1m}$ – амплітуда струму, напруги на первинній обмотці трансформатора зв'язку та електричної потужності в першому контурі, відповідно;

$I_{2m}, U_{L_2 m}, P_{2m}$ – амплітуда струму, напруги на «вихідній» індуктивності і електричної потужності в другому контурі, відповідно;

$Q_2 = \dfrac{\omega \cdot L_2}{R_2}$ – добротність другого контуру без урахування індуктивності вторинної обмотки трансформатора зв'язку.

Реалізація даного режиму має місце при коефіцієнті електромагнітного зв'язку – $k_{12\max}$ між обмотками трансформатора зв'язку:

$$k_{12\max} = \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{(\omega \cdot L_{1T}) \cdot (\omega \cdot L_{2T})}}. \quad (2)$$

Розглянемо елементну базу підсилювача відповідно його експериментальній моделі (рис. 1). Перший «вхідний» контур включає в себе:

джерело гармонічної напруги, яка змінюється за законом

$$E(t) = E \cdot \sin(\omega t),$$

де E = 1 В – амплітуда; $f = \omega / 2\pi$ = 25 кГц – робоча частота;

активний опір R_1 = 0,1 Ом;

ємність C_1 = 2,763 мкФ;

індуктивність первинної обмотки трансформатора зв'язку між контурами L_{1T} = 14,8 мкГн.

Другий «вихідний» контур складається з таких елементів:

індуктивність вторинної обмотки трансформатора зв'язку між контурами L_{2T} = 14,8 мкГн;

ємність C_2 = 0,22мкФ;

«вихідна» індуктивність L_2 = 169,2 мкГн;

активний опір R_2 = 0,35 Ом.

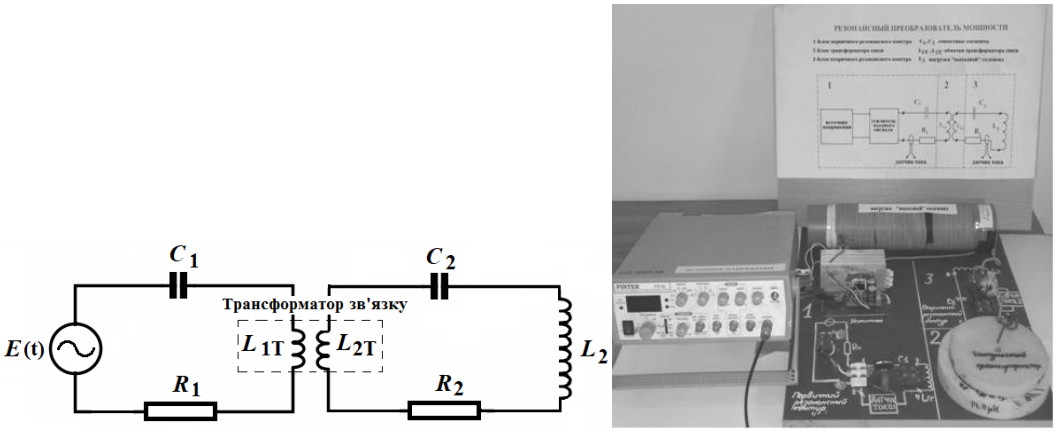
Відмітимо, що у прийнятій схемі з достатньою строгістю дотримуються резонансні умови в контурах (відхилення по частотах не перевищують ~ 0,8 %) [9].

Фізично, максимум збуджуваних струму і потужності можна пояснити мінімально можливим перекачуванням енергії з вторинного контуру в первинний. Причому цей ефект досягається відповідним рівнем електромагнітного зв'язку між контурами згідно з формулою (2).

Зауважимо, що коефіцієнт електромагнітного зв'язку між обмотками має наступні значення: при розрахунках $k_{12\max} \approx 0,08$, при експерименті $k_{12\max} \approx 0,093$.

Розглянемо також інтегральні показники роботи представленого підсилювача. Так, чисельні значення відношення «вихідної» потужності перетворювача до «вихідної» потужності першого контуру

$\frac{U_{L2m} \cdot I_{2m}}{U_{L1Tm} \cdot I_{1m}}$ дорівнюють 3,3 при розрахунках та 3,2 при експерименті. Тобто спостерігаємо розбіжність ~ 3 %.



а) **б)**

Рис. 1. Резонансний підсилювач електричної потужності
а) принципова схема; б) експериментальна модель

Відношення «вихідної» потужності перетворювача до «вихідної» потужності джерела – коефіцієнт посилення електричної потужності $K = \frac{U_{L2m} \cdot I_{2m}}{E \cdot I_{1m}}$ має значення при розрахунках 37,8, а при експерименті – 35,0, що відповідає розбіжності ~ 9 %.

Порівняльні результати обчислень по наведеним аналітичним залежностям і вимірювань таких параметрів і характеристик першого і другого контурів, як: робоча частота, збуджений струм, напруга і потужність, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати обчислень і вимірювань параметрів і характеристик першого і другого контурів

Параметри, характеристики		Робоча частота, кГц	Збуджений струм, А	Напруга на обмотці трансформатора зв'язку, В	Потужність джерела, Вт	Напруга на «вихідній» індуктивності, В	«Вихідна» потужність на індуктивності, Вт
Перший контур	Розра-хунок	25,0	5,0	11,0	5,0		
	Експе-римент	4,89	5,46	11,58	5,46		
Другий контур	Розра-хунок	25,0	2,7	6,19		6,19	189,2
	Експе-римент	24,93	3,39	5,8		5,8	191,2

Таким чином, порівняння значень теоретичних і експериментальних характеристик досліджуваного підсилювача показало дуже добрий їх збіг на рівні 3…9 %. Незначні відхилення пояснюються розбіжністю реальних і розрахункових робочих частот в контурах і впливом зовнішніх електромагнітних полів, наприклад, вплив поля «вихідного» соленоїда на електромагнітні процеси в трансформаторі зв'язку.

Висновки

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження узгоджуються з рекомендаціями Н. Тесла, відповідно до яких резонансне «накачування» вторинного «вихідного» контуру повинно проводитися досить малими електричними впливами з боку первинного «вхідного» контуру на частоті, що дорівнює власним частотам контурів підсилювача. В цілому, отримані результати ілюструють реальні можливості багаторазового посилення потужності (в ~ 35…37,8 разів) за допомогою резонансного перетворювача електромагнітної енергії, розробленого на використанні ідеї «трансформатора Тесла».

Наукова новизна цієї роботи полягає у всебічному обґрунтуванні принципової дієвості резонансного підсилювача електричної потужності, заснованому на висновках узагальненого теоретичного аналізу і експериментах, виконаних для експериментальної моделі підсилювача. Результати цієї роботи необхідні для проектування електротехнічних пристроїв з резонансними компонентами, наприклад, для живлення низькоомного навантаження підвищеною напругою, в пристроях індукційного нагріву та при розробці енергозберігаючих технологій для вирішення нагальних проблем сучасного автотранспорту [10,

11]. Вельми перспективним в напрямку проведених досліджень бачаться подальші розглядання процесів в системі з двох індуктивно-пов'язаних послідовних резонансних контурів, збуджуваних часовою послідовністю ангармонічних сигналів.

Література

1. Резонанс – друг і ворог [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://kpi.ua/resonance.

2. Почему обрушился Египетский мост в Санкт-Петербурге? [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://petrogazeta.ru/history/246.

3. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М. : Оникс, 2006. – 1056 с.

4. Тесла Н. Тесла и его подлинные взгляды. Лучшие работы разных лет / Н. Тесла ; [пер. с англ.]. – М. : Эксмо, 2010. – 320 с.

5. Batygin Yu. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer / Yu. Batygin, S. Shinderuk, S. Serikov // Danish Scientific Journal. – 2018. – No. 11. – P. 72–79.

6. Теоретические основы электротехники / [К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин]. – 4-е издание. Том 1. – СПб : Питер, 2003. – С. 317–318.

7. Батыгин Ю.В. Резонансный усилитель электрической мощности. Основные расчётные соотношения / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.А. Шиндерук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2018. – № 32(1308). – С. 59–63. – DOI : 10.20998/2079-3944.2018.32.11.

8. Батыгин Ю.В. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.А. Шиндерук // Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – № 2. – С. 34–42. – DOI : 10.15588/1607-6761-2019-2-3.

9. Батыгин Ю.В. Резонансный усилитель электрической мощности. Экспериментальные исследования / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.А. Шиндерук, Г.С. Сериков, Е.Ф. Еремина // Перспективні технології та прилади. – 2018.– № 13. – С. 18–24.

10. Батигін Ю.В. Особливості збудження електромагнітних сил при магнітно-імпульсній обробці листових феромагнетиків / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 1. – С. 71–77.

11. Hnatov A. Energy saving technologies for urban bus transport / A. Hnatov, Shch. Arhun, S. Ponikarovska // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2017. – V. 14. – no.4. – P. 4649–4664.

References

1. Rezonans – druh i voroh [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://kpi.ua/resonance.

2. Pochemu obrushilsya Egipetskij most v Sankt-Peterburge? [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://petrogazeta.ru/history/246.

3. Yavorskij B.M. Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov VUZov / B.M. Yavorskij, A.A. Detlaf, A.K. Lebedev. – 8-e izd., pererab. i ispr. – M. : Oniks, 2006. – 1056 s.

4. Tesla N. Tesla i ego podlinnye vzglyady. Luchshie raboty raznyh let / N. Tesla ; [per. s angl.]. – M. : Eksmo, 2010. – 320 s.

5. Batygin Yu. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer / Yu. Batygin, S. Shinderuk, S. Serikov // Danish Scientific Journal. – 2018. – No. 11. – P. 72–79.

6. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki / [K.S. Demirchyan, L.R.Nejman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin]. – 4-e izdanie. Tom 1. – SPb : Piter, 2003. – S. 317–318.

7. Batygin Yu.V. Rezonansnyj usilitel elektricheskoj moshnosti. Osnovnye raschyotnye sootnosheniya / Yu.V. Batygin, G.S. Serikov, S.A. Shinderuk // Visnik Nacionalnogo tehnichnogo universitetu «HPI». Seriya: Problemi udoskonalennya elektrichnih mashin i aparativ. Teoriya i praktika. – 2018. – № 32(1308). – C. 59–63. – DOI : 10.20998/2079-3944.2018.32.11.

8. Batygin Yu.V. Rezonansnyj usilitel reaktivnoj elektricheskoj moshnosti. Analiz elektromagnitnyh processov / Yu.V. Batygin, G.S. Serikov, S.A. Shinderuk // Elektrotehnika ta elektroenergetika. – 2019. – № 2. – S. 34–42. – DOI : 10.15588/1607-6761-2019-2-3.

9. Batygin Yu.V. Rezonansnyj usilitel elektricheskoj moshnosti. Eksperimentalnye issledovaniya / Yu.V. Batygin, G.S. Serikov, S.A. Shinderuk, G.S. Serikov, E.F. Eremina // Perspektivni tehnologiyi ta priladi. – 2018.– № 13. – S. 18–24.

10. Batyhin Yu.V. Osoblyvosti zbudzhennia elektromahnitnykh syl pry mahnitno-impulsnii obrobtsi lystovykh feromahnetykiv / Yu.V. Batыhyn, A.V. Hnatov // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – № 1. – S. 71–77.

11. Hnatov A. Energy saving technologies for urban bus transport / A. Hnatov, Shch. Arhun, S. Ponikarovska // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2017. – V. 14. – no.4. – P. 4649–4664.

Надійшла / Paper received : 28.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-227-231
УДК 621.314

О.О. РУБАНЕНКО
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ НЕСТАБІЛЬНОСТІ НЕГАРАНТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В статті досліджено поняття негарантованого джерела енергії та вплив глибокої інтеграції відновлюваних джерел енергії в електричні мережі. Проаналізовано шляхи компенсації нестабільності негарантованих джерел енергії. Наведено класифікацію задач прогнозування генерування електроенергії відновлюваних джерел енергії залежно від призначення використання прогнозованих даних. Для оцінки впливу на добове генерування протягом року метеорологічних факторів використано кореляційно-регресійний аналіз. З цією метою визначено коефіцієнти кореляції Пірсона, Спірмена і Кендела. Встановлено найбільш впливові метеорологічні фактори на генерування фотовольтаїчною електричною станцією, зокрема: відносна вологість; температура на висоті 2 м; інсоляція та інші.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, негарантовані джерела енергії, електричні мережі, кореляційно-регресійний аналіз, коефіцієнти кореляції Кендела, Спірмена, Пірсона.*

O.O. RUBANENKO
Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF INSTABILITY OF UNGUARANTEED ENERGY SOURCES IN POWER GRIDS

The paper investigates the concept of unguaranteed energy source and the impact of integration of renewable energy sources in power grids. Means to compensate for the instability of unguaranteed energy sources are analyzed. The main difference between bulk power supply in electricity networks and distributed power supply is that the change in power flows (flows of electricity flows) and the composition of the balance structure mainly depends only on the consumption schedule. In a power grid with deep integration of renewable energy sources without sufficient storage reserve during the day the composition of generating capacity changes under the influence of various factors, including meteorological, as well as the scheme of energy transmission to consumers under the influence of natural conditions. The composition of the equipment may change significantly, which affects the balance reliability of the system. The classification of tasks for forecasting the power generation of renewable energy sources depending on the purpose of using the forecoasting data. The task of forecasting the power generation of renewable energy sources is a non-linear task with the relationship between the amount of renewable energy sources generation and the influential meteorological and technological factors, which certainly affect the accuracy of the forecast. Therefore, it is advisable to use the theory of sensitivity analysis of renewable energy sources generation to changes in meteorological factors and technological conditions of power stations in power grids. In the task of forecasting the power generation of renewable energy sources, it is important to identify the most influential meteorological factors, which will simplify forecasting models and focus on more informative indexes. Correlation analysis was used to assess the impact on the daily generation of meteorological factors during the year. For this purpose, the correlation coefficients of Pearson, Spearman and Kendel were determined. The most influential meteorological factors on the generation of photovoltaic power station, in particular: relative humidity; temperature at of 2 m; solar insolation and others.

Keywords: renewable energy sources, unguaranteed energy sources, power grids, correlation analysis, Kendel, Spearman, Pearson correlation coefficients.

Вступ. За даними Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики (IRENA) зазначено швидкі темпи нарощування встановленої потужності відновлюваних джерел енергії [1], в тому числі і негарантованих. В нормативному документі СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014 «Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище» під електростанцією негарантованої потужності розуміють електростанцію, яка використовує нестабільний природний енергоресурс, в результаті чого вона має обмежену можливість або зовсім не має можливості регулювати свою потужність у відповідності із заданим добовим графіком [4]. В вимогах до вітрових та сонячних електростанцій при їхній роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України зазначено, що вітрові електричні станції (ВЕС) та сонячні електричні станції (СЕС) прийнято вважати електростанціями негарантованої потужності за певних погодних умов (існує можливість припинення видавання їх активної потужності в мережу: для ВЕС при швидкості вітру < 3-5 м/с, а для СЕС при сонячній радіації < 200 Вт·м^2) [5]. В статті [6] автор під негарантованою потужністю згадує потужність що генерують СЕС і ВЕС, а також наголошує на наявність певних ризиків забезпечення стабільності не тільки розподільних електричних мереж, а й енергетичної системи в цілому. Зокрема, в статті [6] зазначено, що з метою декарбонізації, тобто зменшення викидів усіх видів парникових газів від спалювання викопного палива, в першу чергу вугілля, при виробництві теплової та електричної енергії, що становлять близько 40% загального обсягу світових викидів просувалась ідея тотального домінування відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) над традиційною енергетикою. Але на думку автора це призводить до руйнування надійних енергетичних систем. Також, поняття «негарантованого» живлення використовується в зарубіжній науковій статті [7], автор наголошує, що розвиток ВДЕ значно впливає на традиційне генерування, особливо на забезпечення надійності та статичної стійкості системи. Причину в цьому вбачає в негарантованому живленні від генераторів перервної потужності, що вимагає постійно ввімкненої резервної потужності в мережу, яка не перевищує 20%. Задача аналізу нестабільності генерування ВДЕ та її вплив на якість електроенергії, роботу електромереж розглядалась в ряді статей [8-15], але не втратила своєї актуальності і досі.

Задачі аналізу генерування ВДЕ. Основна відмінність централізованого електропостачання в

електричних мережах від розосередженого полягає в тому що зміна потоків потужності (потоків перетікань електроенергії) та склад балансової структури головним чином залежать лише від графіку споживання. У електричних мережах з глибокою інтеграцією ВДЕ без достатнього акумулюючого резерву протягом доби змінюється склад генерувальних потужностей під впливом різних факторів, в тому числі і метеорологічних, а також схема передачі енергії до споживачів під дією природних умов. Зокрема, як зазначено в [16] суттєво може змінюватись склад обладнання, що впливає на балансову надійність системи. Основні технології забезпечення балансової надійності об'єднаних електричних систем в умовах інтеграції РДЕ (розосереджених джерел енергії) з негарантованою потужністю наведені на рис. 1 [17].

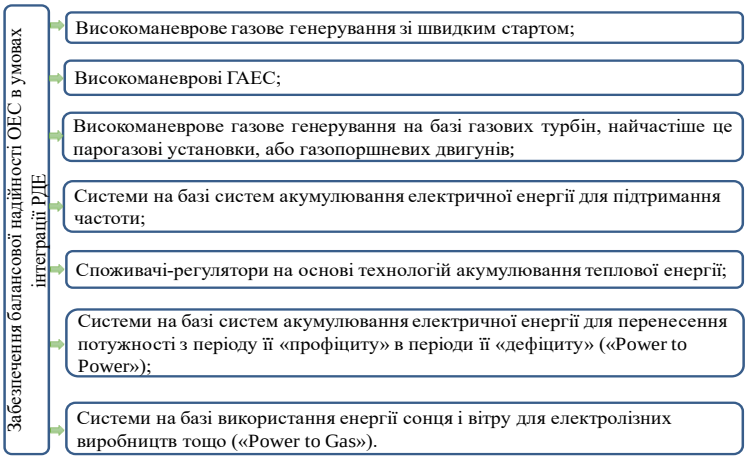


Рис. 1. Шляхи компенсації нестабільності генерування негарантованими джерелами енергії

Тому важливо оцінити можливість забезпечення балансової надійності ВДЕ у електричних мережах з урахуванням їх графіків генерування та споживання. Оцінити та спрогнозувати генерування ВДЕ в електричній системі не можливо без аналізу експериментальних даних [16], які можуть бути представлені у вигляді часових рядів. Задачам прогнозування в сучасних умовах функціонування енергетичної галузі приділено багато уваги, зокрема: прогнозування балансу потужності в системах електропостачання [18]; прогнозування значення необхідного резерву потужності в електричних системах з ВДЕ [19]; прогнозування погодинного генерування ФЕС [20]; прогнозування обсягів недовідпуску електроенергії в аварійних режимах [21]; прогнозування споживання електроенергії і генерування ВДЕ в залежності від зміни метеорологічних факторів (сонячне випромінення, температура навколишнього середовища та швидкість вітру) та інші. Задачі прогнозування генерування електроенергії ВДЕ можна класифікувати в залежності від призначення використання прогнозованих даних, як показано на рис. 2. Задача прогнозування генерування електроенергії ВДЕ є задачею нелінійного характеру з зв'язками між обсягом генерування ВДЕ та впливними метеорологічними та технологічними факторами, які безумовно впливають на точність прогнозу. Тому доцільним є застосування теорії аналізу чутливості генерування ВДЕ до зміни метеорологічних факторів та технологічних умов електричних станцій в електричних мережах. В задачах прогнозування генерування ВДЕ важливо визначити найбільш впливні метеорологічні фактори, що дасть змогу спростити прогностичні моделі та сфокусуватись на інформативніших показниках.

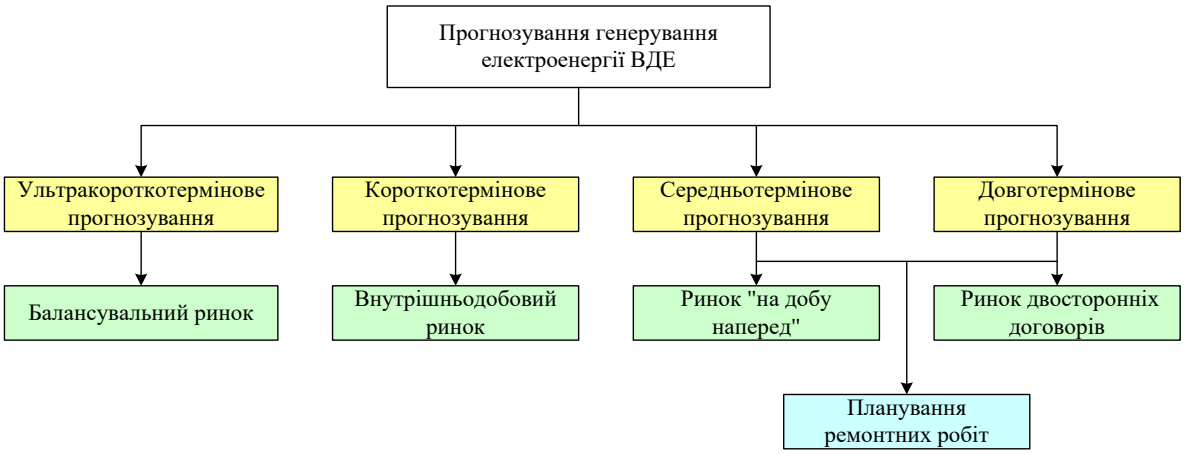


Рис. 2. Класифікація задач прогнозування генерування електроенергії ВДЕ в залежності від призначення використання прогнозованих даних

Кореляційно-регресійний аналіз впливу на добове генерування ВДЕ протягом року метеорологічних факторів

Для оцінки впливу на добове генерування протягом року метеорологічних факторів запропоновано використати кореляційно-регресійний аналіз. У якості метеорологічних впливних факторів обрано фактори, інформація по яких є у вільному доступі і представлена на сайті https://power.larc.nasa.gov. З цією метою визначено коефіцієнти кореляції Пірсона, Спірмена і Кендела. Результати визначення цих коефіцієнтів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення коефіцієнтів кореляції Кендела, Спірмена та Пірсона генерування електроенергії Цекинівська СЕС № 2 (4-5 черги) протягом 2018 року та протягом 2019 року в залежності від зміни метеорологічних факторів

№	Метеорологічний фактор		Коефіцієнт кореляції 2018 р.			Коефіцієнт кореляції 2019 р.		
			Спірмена	Кендела	Пірсона	Спірмена	Кендела	Пірсона
Вологість, опади, тиск								
1	Опади	PRECTOT	-0,411	-0,286	-0,230	-0,371	-0,254	-0,156
2	Питома вологість на висоті 2 м	QV2M	0,659	0,539	0,669	0,476	0,389	0,478
3	Відносна вологість на висоті 2 м	RH2M	-0,747	-0,530	-0,739	-0,764	-0,550	-0,756
4	Поверхневий тиск	PS	-0,036	-0,020	-0,049	0,099	0,067	0,096
Температура								
5	Середня температура на висоті 2 м	T2M_RANGE	0,729	0,524	0,735	0,705	0,507	0,710
6	Температура поверхні Землі	TS	0,703	0,492	0,729	0,716	0,518	0,719
7	Температура точка роси на висоті 2 м	T2MDEW	0,622	0,418	0,637	0,561	0,395	0,564
8	Температура вологої колби на висоті 2 м	T2MWET	0,621	0,417	0,637	0,560	0,394	0,563
9	Максимальна температура на висоті 2 м	T2M_MAX	0,749	0,534	0,772	0,746	0,550	0,751
10	Мінімальна температура на висоті 2 м	T2M_MIN	0,638	0,432	0,656	0,630	0,448	0,636
11	Значення температури на висоті 2 м	T2M	0,703	0,491	0,728	0,713	0,517	0,717
Вітер								
12	Середня швидкість вітру на висоті 50 м	WS50M_RANGE	0,109	0,074	0,064	0,042	0,028	0,027
13	Середня швидкість вітру на висоті 10 м	WS10M_RANGE	-0,061	-0,040	-0,100	-0,027	-0,020	-0,029
14	Мінімальна швидкість вітру на висоті 50 м	WS50M_MIN	-0,183	-0,120	-0,201	-0,190	-0,125	-0,198
15	Мінімальна швидкість вітру на висоті 10 м	WS10M_MIN	-0,170	-0,112	-0,199	-0,199	-0,134	-0,224
16	Максимальна швидкість вітру на висоті 50 м	WS50M_MAX	-0,100	-0,065	-0,140	-0,158	-0,106	-0,153
17	Максимальна швидкість вітру на висоті 10 м	WS10M_MAX	-0,183	-0,121	-0,202	-0,173	-0,116	-0,152
18	Швидкість вітру на висоті 50 м	WS50M	-0,189	-0,125	-0,189	-0,189	-0,126	-0,181
19	Швидкість вітру на висоті 10 м	WS10M	-0,209	-0,136	-0,224	-0,227	-0,152	-0,216
Сонячне випромінювання								
20	Індекс прозорості (від 0 до 1)	KT	0,840	0,653	0,838	0,791	0,599	0,798
21	Інсоляція всього неба на горизонтальній поверхні	ALLSKY_SFC_SW_DWN	0,916	0,748	0,914	0,894	0,731	0,892
22	Тепловий інфрачервоний (довгохвильовий) радіаційний потік	ALLSKY_SFC_LW_DWN	0,408	0,252	0,385	0,424	0,288	0,413

Висновки

Проаналізувавши отримані результати табл. 1 можна виділити найбільш впливові метеорологічні фактори га генерування СЕС з кожної групи, зокрема: з групи «Вологість, опади, тиск» – відносна вологість на висоті 2 м; з групи «Температура» – максимальна температура на висоті 2 м; з групи «Вітер» – швидкість

вітру на висоті 10 м (середньодобова швидкість вітру на висоті 10 метрів над поверхнею землі.); з групи «Сонячне випромінювання» – інсоляція всього неба на горизонтальній поверхні.

Література

1. IRENA (2019), Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. URL: https://www.irena.org/publications/2019/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2019
2. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 році : постанова НКРЕКП № 440 від 29.03.2019. – К. : НКРЕКП, 2018. – 304 с.
3. Домбровський О. Україні потрібна нова "зелена" енергетична стратегія [Електронний ресурс] / О. Домбровський, Г. Гелетуха // Економічна правда. – 03.01.2019. – Режим доступу : https://www.epravda.com.ua/rus/columns /2020/01/3/655486/
4. Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище: СОУ-Н ЕЕ 40.1 : нормативний документ. – 00100227-101:2014
5. Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їхній роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України (Проект): СОУ НЕК ХХ.ХХХ [Електронний ресурс]. – Офіц. вид. – Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго», 2017. – 43 с. – Режим доступу : https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/02/Vymogy-do-VES-ta-SES_2-red_08112017.pdf
6. Лосєв А. Безвуглецева енергетика – вітер у кишенях споживача або ядерне заощадження. [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу : https://www.unian.ua/economics/energetics/10477752-bezvugleceva-energetika-viter-u-kishenyah-spozhivacha-abo-yaderne-zaoshchadzhennya.html
7. Tyagunov M. Distributed energysystem's is the future of the world's power industry, 2017 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes & Systems (IT-DREPS), Amman, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IT-DREPS.2017.8277817. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8277817&isnum ber=8277786
8. Рубаненко О.О. Аналіз роботи ВДЕ в розподільних мережах та шляхи компенсації їх нестабільності / О.О. Рубаненко, В.П. Янович, І.О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 5. – С. 176 –179.
9. Рубаненко О.О. Мікроелектромережі як засіб підвищення надійності електропостачання підприємств в АПК / О.О. Рубаненко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2016. – № 175. – С. 43–45.
10. Кучанський В.В. Заходи та засоби підвищення надійності та якості електропостачання в електроенергетичних системах з відновлюваними джерелами енергії / В.В. Кучанський, А.Б. Нестерко, І.О. Гунько // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 196 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків : ХНТУСГ, 2018. – С. 41.
11. Рубаненко О.О. Використання біоресурсів для компенсації нестабільності вітрових і сонячних електричних станцій з метою забезпечення незалежного електропостачання підприємств АПК / О.О. Рубаненко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2018. – № 196. – С. 8-9.
12. Рубаненко О.О. Створення мікроелектромереж для забезпечення надійного електропостачання підприємств АПК на прикладі Уладово-Люлинецької дослідно-селекційної станції / О.О. Рубаненко, А.А. Видмиш, В.В. Явдик // Вібрації в техніці та технологіях. – 2019. – № 1(92). – С. 23–29.
13. Rubanenko O., Yanovych V. Analysis of instability generation of Photovoltaic power station, in IEEE 7th international conference on energy Smart systems, Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020
14. Gundebommu S.L., Rubanenko O., Kuchanskyy V., Hunko I. Assessment of the Power Quality in Electric Networks with Wind Power Plants, in IEEE 7th international conference on energy Smart systems, Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020
15. Olena Rubanenko, Iryna Hunko, Oleksandr Rubanenko, Anton Rassõlkin. Influence of Solar Power Plants on 0.4 kV Consumers. 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019, IEEE) in Riga, Latvia, 7-9 October 2019, Proceedings.
16. Кулик В.В. Оцінювання балансової надійності відновлюваних джерел електроенергії у розподільних мережах з урахуванням типових графіків генерування та споживання / В.В. Кулик, В.Ф. Кириченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 1. – С. 73–79.
17. Проект звіту з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. НЕК УКРЕНЕРГО. 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/11/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf
18. Лежнюк П. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання / П. Лежнюк, С. Кравчук, І. Котилко // ОЕІЕТ. – Бер 2020. – Том 38, № 2. – С. 100–106.
19. P. Lezhniuk, V. Komar, and S. Kravchuk, "Regimes Balancing in the Local Electric System with

Renewable Sources of Electricity," in *2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2019, pp. 1-4.

20. P. Lezhniuk, S. Kravchuk, V. Netrebskiy, V. Komar, and V. Lesko, "Forecasting Hourly Photovoltaic Generation On Day Ahead," in *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, pp. 184-187.

21. Лежнюк П.Д. Аналіз метеопараметрів для погодинного прогнозування виробітку електроенергії фотовольтаїчними електростанціями на добу наперед / П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук, Є.С. Дідіченко // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2017. – № 1 (6).

References

1. IRENA (2019), Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. URL: https://www.irena.org/publications/2019/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2019

2. Zvit pro rezultaty diialnosti Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuvannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh, u 2018 rotsi : postanova NKREKP № 440 vid 29.03.2019. – K. : NKREKP, 2018. – 304 s.

3. Dombrovskyi O. Ukraini potribna nova "zelena" enerhetychna stratehiia [Elektronnyi resurs] / O. Dombrovskyi, H. Heletukha // Ekonomichna pravda. – 03.01.2019. – Rezhym dostupu : https://www.epravda.com.ua/rus/columns /2020/01/3/655486/

4. Normy tekhnolohichnoho proektuvannia enerhetychnykh system i elektrychnykh merezh 35 kV i vyshche: SOU-N EE 40.1 : normatyvnyi dokument. – 00100227-101:2014

5. Vymohy do vitrovykh ta soniachnykh elektrostantsii pry yikhnii roboti paralelno z obiednanoiu enerhetychnoiu systemoiu Ukrainy (Proekt): SOU NEK KhKh.KhKhKh [Elektronnyi resurs]. – Ofits. vyd. – Derzhavne pidpryiemstvo «Natsionalna enerhetychna kompaniia «Ukrenerho», 2017. – 43 s. – Rezhym dostupu : https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/02/Vymogy-do-VES-ta-SES_2-red_08112017.pdf

6. Losiev A. Bezvuhletseva enerhetyka – viter u kysheniakh spozhyvacha abo yaderne zaoshchadzhennia. [Elektronnyi resurs]. – 2019. – Rezhym dostupu : https://www.unian.ua/economics/energetics/10477752-bezvugleceva-energetika-viter-u-kishenyah-spozhivacha-abo-yaderne-zaoshchadzhennya.html

7. Tyagunov M. Distributed energysystems is the future of the worlds power industry, 2017 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes & Systems (IT-DREPS), Amman, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IT-DREPS.2017.8277817. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8277817&isnum ber=8277786

8. Rubanenko O.O. Analiz roboty VDE v rozpodilnykh merezhakh ta shliakhy kompensatsii yikh nestabilnosti / O.O. Rubanenko, V.P. Yanovych, I.O. Hunko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2019. – № 5. – S. 176 –179.

9. Rubanenko O.O. Mikroelektromerezhi yak zasib pidvyshchennia nadiinosti elektropostachannia pidpryiemstv v APK / O.O. Rubanenko // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. «Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy». – 2016. – № 175. – S. 43–45.

10. Kuchanskyi V.V. Zakhody ta zasoby pidvyshchennia nadiinosti ta yakosti elektropostachannia v elektroenerhetychnykh systemakh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii / V.V. Kuchanskyi, A.B. Nesterko, I.O. Hunko // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. Vypusk 196 "Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy". – Kharkiv : KhNTUSH, 2018. – S. 41.

11. Rubanenko O.O. Vykorystannia bioresursiv dlia kompensatsii nestabilnosti vitrovykh i soniachnykh elektrychnykh stantsii z metoiu zabezpechennia nezalezhnoho elektropostachannia pidpryiemstv APK / O.O. Rubanenko // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy. – 2018. – № 196. – S. 8-9.

12. Rubanenko O.O. Stvorennia mikroelektromerezh dlia zabezpechennia nadiinoho elektropostachannia pidpryiemstv APK na prykladi Uladovo-Liulynetskoi doslidno-selektsiinoi stantsii / O.O. Rubanenko, A.A. Vydmysh, V.V. Yavdyk // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2019. – № 1(92). – S. 23–29.

13.Rubanenko O., Yanovych V. Analysis of instability generation of Photovoltaic power station, in IEEE 7th international conference on energy Smart systems, Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020

14. Gundebommu S.L., Rubanenko O., Kuchanskyy V., Hunko I. Assessment of the Power Quality in Electric Networks with Wind Power Plants, in IEEE 7th international conference on energy Smart systems, Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020

15. Olena Rubanenko, Iryna Hunko, Oleksandr Rubanenko, Anton Rassõlkin. Influence of Solar Power Plants on 0.4 kV Consumers. 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019, IEEE) in Riga, Latvia, 7-9 October 2019, Proceedings.

16. Kulyk V.V. Otsiniuvannia balansovoi nadiinosti vidnovliuvanykh dzherel elektroenerhii u rozpodilnykh merezhakh z urakhuvanniam typovykh hrafikiv heneruvannia ta spozhyvannia / V.V. Kulyk, V.F. Kyrychenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2018. – № 1. – S. 73–79.

17. Proekt zvitu z otsinky vidpovidnosti (dostatnosti) heneruiuchykh potuzhnostei. NEK UKRENERHO. 2018. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/11/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf

18. Lezhniuk P. Fotoelektrychni stantsii yak element enerhoefektyvnoho elektropostachannia / P. Lezhniuk, S. Kravchuk, I. Kotylko // OEIET. – Ber 2020. – Tom 38, № 2. – S. 100–106.

19. P. Lezhniuk, V. Komar, and S. Kravchuk, "Regimes Balancing in the Local Electric System with Renewable Sources of Electricity," in 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2019, pp. 1-4.

20. P. Lezhniuk, S. Kravchuk, V. Netrebskiy, V. Komar, and V. Lesko, "Forecasting Hourly Photovoltaic Generation On Day Ahead," in 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, pp. 184-187.

21. Lezhniuk P.D. Analiz meteoparametriv dlia pohodynnoho prohnozuvannia vyrobitku elektroenerhii fotovoltaichnymy elektrostantsiiamy na dobu napered / P.D. Lezhniuk, V.O. Komar, S.V. Kravchuk, Ye.S. Didichenko // Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK. – 2017. – № 1 (6).

Надійшла / Paper received : 24.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-232-235
УДК 621

М.О. БАЖУРА, О.С. ПИВОВАР
Хмельницький національний університет
О.В. ЦИРА
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

ОГЛЯД СТАНДАРТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ МЕРЕЖЕЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Технологія PLC, передачі інформації по силових лініях, розвивається з початку 20 століття. Починаючи з розв'язку простих задач передачі інформації від датчиків, сучасна PLC є конгломератом ряду технологій. Стандарти, що описують технологію PLC: HomePlug 1.0, HomePlug AV, HomePlug C&C. Технологія передачі в загальному визначається застосуванням OFDM модуляції. Сучасний підхід базується на формуванні спектру сигналу із застосуванням FFT та Wavelet способів. Кількість частот несучих досягає 4096, а швидкість передачі даних – до 2 Гбіт/с. Проте, одною з проблем OFDM модуляції для PLC є задача швидкої ідентифікації завад на певних частотах та ідентифікація несучих частот в прийнятому сигналі.

Ключові слова: силова лінія, передача даних, перетворення Фур'є.

M.O. BAJURA, O.S. PIVOVAR
Khmelnitsky national university, Ukraine
O. TSYRA
Odessa national academy of communication named by O. Popov

ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ МЕРЕЖЕЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

PLC technology, the transmission of information about power lines, has been evolving since the early 20th century. Starting with the simple tasks of transmitting information from sensors, modern PLC is a conglomeration of a number of technologies.

Compared to the OFDM modulation method, which uses fast Fourier transform (FFT), Wavelet-type OFDM modulation has the best filtering characteristics and provides greater in-depth projection of room signals. This, in turn, makes it easier to adapt to changing transmission conditions and provides extremely high resistance to premises and search signals caused by multi-beam interference, as well as other causes. The ability to program the spectrum of signals generated in the line allows not only to get rid of interference caused in the lines, but also prevents unwanted side electromagnetic interference by line conductors, for example, in the short frequency range of amateur radio broadcasting.

Standards describing PLC technology: HomePlug 1.0, HomePlug AV, HomePlug C&C. Transmission technology will generally determine the application of OFDM modulation. The modern approach is based on the formation of the signal spectrum using FFT and Wavelet methods. The number of carrier frequencies reaches 4096, and data rates - up to 2 Gbps. However, along with the problem of OFDM modulation for PLC, there is the task of rapid identification of interference at certain frequencies and identification of carrier frequencies in the received signals. The ability to program the range of signals generated in the line allows not only to get rid of interference caused in the lines, but also prevents unwanted side electromagnetic interference by line conductors, for example, in the short frequency range of amateur radio broadcasting.

Keywords: power line, data transmission, Fourier transform.

Вступ

Спочатку перші застосування, що використовують передачу по лініях електропередач, були зроблені для управління, захисту ліній електропередач, обслуговування та зарядки [1]. Пізніше кілька факторів, таких як дерегуляція ринку телекомунікацій у США, Європі та Азії, а також зародження та вибуховий ріст Інтернету, який супроводжувався більшим попитом на послуги цифрового зв'язку, зробили PLC технологією, що дозволяла закрити необхідність в термінових задачах забезпечення зв'язку для багатьох інших застосувань.

Перші патенти в цій галузі датуються початком 1900-х років [2]. У 1913 році були виготовлені автоматичні електромеханічні ретранслятори лічильників, а в 1922 році розпочався вузькосмуговий пристрій, коли перші несучі частотні системи почали працювати по лініях високої напруги в діапазоні частот від 15 до 500 кГц для телеметричних систем обробки даних.

Перші системи передачі даних по електричних мережах з'явилися ще в 1930-х роках, в основному вони використовувалися для сигналізації в енергосистемах і на залізницях, характеризуючись дуже низькою пропускною спроможністю [1]. У кінці 1990-х років ряд компаній здійснили перші великі проекти в цій області, проте в процесі експлуатації були виявлені серйозні проблеми, основною з яких була слабка завадозахищеність.

Дослідження в напрямку розвитку PLC систем активізувались і набули більшої популярності за останні два десятиліття, оскільки були запропоновані нові методи модулювання та кодування контролю помилок, а також нові стандарти галузевих альянсів та органів стандартизації. Сьогодні нові технології PLC стають перспективними як для споживачів, так і для постачальників енергії. Тому інтерес до PLC охоплює декілька важливих програм, таких як широкосмуговий доступ до Інтернету, програми Smart Grid (вдосконалене вимірювання та контроль, ціноутворення енергії в режимі реального часу, пікове гоління, моніторинг електромережі, розподілене виробництво енергії тощо), внутрішні дротові локальні Районні мережі (ЛВС) для житлових та ділових приміщень, передачі даних у транспортному засобі, літаків,

управління світлофорами та вуличного освітлення

Технологія передачі даних по електромережах отримала належне комерційне застосування тільки на початку поточного століття, а її впровадження і широке поширення обумовлене появою відповідної елементної бази, у тому числі високопродуктивних контролерів і швидких DSP-процесорів, що дозволяють реалізувати складні методи модуляції сигналу і сучасні алгоритми шифрування даних. Це забезпечило не лише високий рівень достовірності при передачі інформації, але і її захист від несанкціонованого доступу. Також важливе значення мало вирішення проблеми стандартизації різних аспектів технології.

Нині основними організаціями і співтовариствами, що регламентують вимоги до PLC пристроями є IEEE, ETSI, CENELEC, OPERA, UPA і HomePlug Powerline Alliance. Остання з них є міжнародним альянсом, що об'єднує близько 80 відомих на ринку телекомунікацій компаній, серед яких Siemens, Motorola, Samsung і Philips. Діяльність альянсу, організованого в 2000 році, спрямована на проведення наукових досліджень і практичних випробувань сумісності облаштувань різних виробників, що використовують цю технологію, а також на підтримку і просування єдиного стандарту під назвою HomePlug.

Технологія PLC, яка використовує електричну мережу як середовище передачі, є телекомунікаційною технологією з довгою історією виникнення, широким спектром застосувань та реалізацій. До теперішнього часу більше уваги приділяється збільшенню швидкості передачі даних у ПЛК, тоді як енергоефективність досі не вивчалася дуже сильно.

Завдяки швидкому розвитку технології PLC, енергетична ефективність, безсумнівно, є пріоритетом для проектування майбутніх систем PLC.

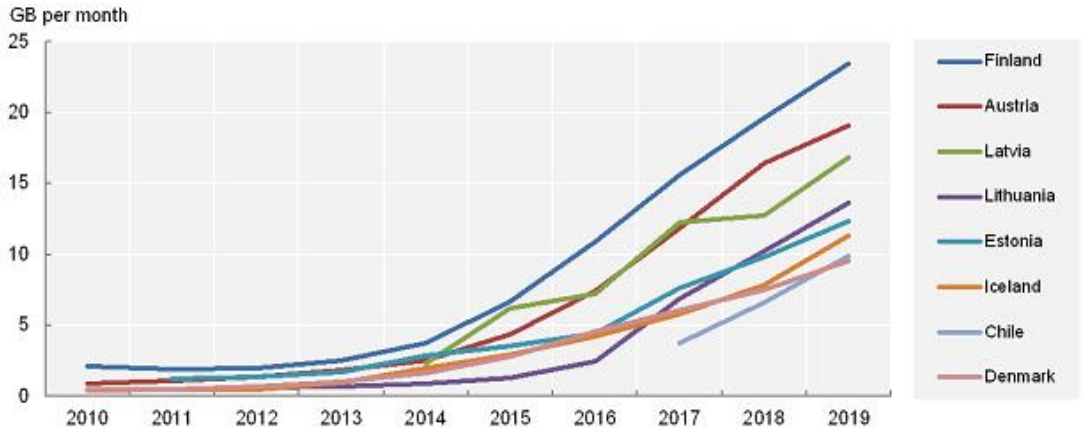


Рис. 1. Фактичне проникнення широкосмугового доступу 2010-2019 роках

Як видно на рисунку 1, в світі (2003-2008 роки та 2010-2019 роки) має місце стрімке насичення ринку послугами широкосмугового доступу. Причому є країни, як Корея, Тайвань де зростання вже наблизилося до свого максимуму по насиченню, так є країни, які тільки почали входити в процес насичення телекомунікаційними мережами – Чілі, Ісландія, Естонія.

Застосування PLC технології

Усе існуючі PLC-системы прийнято розділяти на широкосмугові (BPL – Broadband over Power Lines) і вузькосмугові (NPL – Narrowband over Power Lines). Спектр вирішуваних з їх допомогою завдань дуже широкий, а вибір необхідного методу заснований на характеристиках і об'ємі переданої інформації. Широкосмугові пристрої (зі швидкістю від 1 до 200 Мбіт/с) орієнтовані на системи доступу до Інтернету, на створення домашніх комп'ютерних мереж, а також на додатки, що вимагають високошвидкісного обміну даними : потокове відео, системи відеоконференцзв'язку, цифрової телефонії і т. д.

Найбільший інтерес для розробників апаратури представляють вузькосмугові PLC-модеми у зв'язку з їх відносною дешевизною і поліпшеними характеристиками, що дозволяють працювати не лише в звичайних мережах, але і в мережах з підвищеним рівнем перешкод. Мікросхеми і модулі для вузькосмугових модемів (з пропускною спроможністю каналу від 0,1 до 100 кбит/с) широко застосовуються у складі різних виробів побутового і промислового призначення, при створенні розподілених систем автоматизованого контролю і управління в цехах і системах життєзабезпечення будівель (ліфтах, облаштуваннях кондиціонування і вентиляції), засобах обліку споживання електроенергії, води, газу, тепла, приладах охоронної і пожежної сигналізації.

PLC технології застосовуються для створення мобільних високошвидкісних локальних мереж в офісах, будівлях і реалізації нових концепцій розумних будинків і т. п. Інші перспективні сфери застосування PLC технології [3, 4]:

- системи безпеки;
- системи управління вуличним освітленням;
- системи автоматизації;
- диспетчерські системи;

• системи сигналізацій;
• системи збору інформації датчиків витрат;
• промислові системи моніторингу і управління.

Важливою є можливість спільного використання PLC технології з іншими широкосмуговими технологіями передачі даних, наприклад PLC + WiMAX, PLC + WLAN кт. п.

Стандартизація передачі даних по електромережах

Єдиного уніфікованого стандарту передачі даних по електромережах досі не існує. Проте, зацікавлені сторони, в першу чергу виробники електронного устаткування, створили організації, покликані врегулювати і упорядкувати ситуацію на ринку PLC устаткування.

Існує кілька міжнародних стандартів, що регулюють PLC. Домінуючими стандартами PLC на ринку є IEEE1901 [5] та ITU-T G.hn [6, 7].

З одного боку, готові до продажу продукти, що відповідають IEEE 1901, були сертифіковані або HomePlug Powerline Alliance, в США та Європі, або альянсом HD-PLC, переважно в Японії. З іншого боку, готові до продажу продукти, що відповідають ITU-T G.hn, були сертифіковані альянсом HomeGrid Forum.

Стандарти групи IEEE 1901 розроблено робочою групою IEEE P1901 і визначає технологію високошвидкісного зв'язку ліній електропередач. Стандарти визначають методи як для домашньої мережі, так і для мереж доступу – Інтернет.

Аналіз параметрів технологій PLC

Стандарт IEEE 1901.2010 використовує частоти передачі нижче 100 МГц і забезпечує високі швидкості передачі даних до 500 Мбіт / с на фізичному рівні. Він включає два різні фізичні рівні, один заснований на модуляції ортогонального мультиплексування з частотним поділом для швидкого перетворення Фур'є (OFDM). Це головним чином використовується у США та Європі. А другий - на основі модуляції Wavelet OFDM (обмежений для Японії). Стандарт також відповідає обмеженням електромагнітної сумісності, встановленим національними та міжнародними регуляторними органами, щоб забезпечити успішне співіснування з бездротовими та іншими телекомунікаційними системами.

Основними на сьогодні являються стандарти, створені міжнародним альянсом HomePlug Powerline Alliance, відкритим європейським альянсом OPERA, європейською асоціацією UP A, а також альянсом HD-PLC. Організація HomePlug Powerline Alliance (засновники і учасники : Cisco, Intel, Inellon, Motorola, Texas Instruments, Enikia та ін.) на сьогодні розробила три стандарти:

– HomePlug 1.0 (2001 рік);
– HomePlug AV (2005 рік);
– HomePlug C&C (2007 рік).

HomePlug GP і HomePlug AV2 повністю сумісні з HomePlug AV та IEEE P1901, хоча кожна надає окремий набір можливостей, зосереджених на різних аспектах та питаннях, пов'язаних з різними програмами та робочими середовищами. Порівняльний огляд основних відмінностей між HomePlug AV, HomePlug AV2 та HomePlug GP наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння HomePlug, HomePlug AV2 та HomePlug GP

Стандарт / Властивості	HomePlug AV	HomePlug AV2	HomePlug GP
Головне застосування	Мультимедіа	Мультимедіа для мереж наступного покоління	Домашні мережі SMARTGRID
Фізична швидкість	200 Mbps	2 Gbps	10 Mbps
Частотний діапазон (МГц)	2-30	1.8-86	2-30
Кількість піднесучих	1155	4096	1155
Тип модуляцій на піднесучих	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM, 1024 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM, 1024 QAM, 4096 QAM	QPSK only
Код корегування помилок, відношення	1/2, 16/21	1/2, 16/21, 16/18	1/2

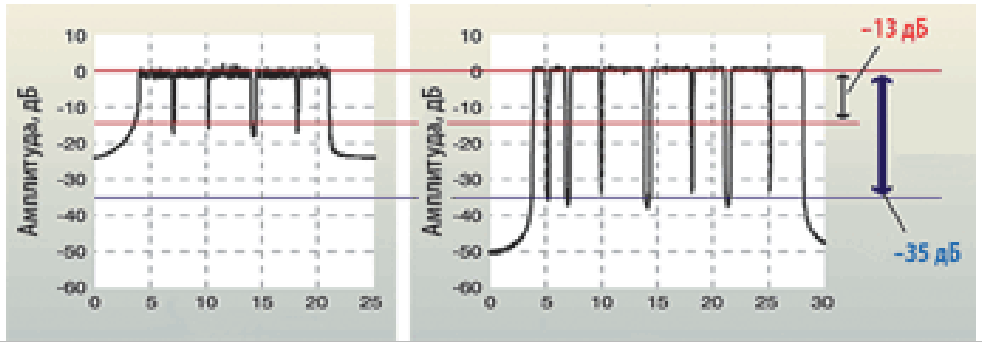
Продукти сімейства HomePlug є найбільш поширеними на ринку. Характеристики, доступні через альянс для широкосмугових PLC, є [8]: HomePlug 1.0, HomePlug AV, HomePlug AV2 та HomePlug Green PHY (GP). Далі ми докладно описуємо основні стандарти та технічні характеристики PLC.

Особливості технології формування несучих частот

Для передачі інформації використовуються ряд частот. Для покращення ідентифікації, зменшення міжчастотного впливу використовується OFDM-модуляція – частотне розділення із застосуванням ортогональної модуляції несучих частот. В цьому методі частоти обираються так, щоб сусідні частоти знаходились в вузлах мінімального впливу від певної несучої частоти.

Порівняно з методом OFDM-модуляції, де використовується швидке перетворення Фур'є (FFT), OFDM-модуляція типу Wavelet відрізняється найкращими характеристиками фільтрації та забезпечує

більшу глибоку режекцію сигналів приміщень. Це, у свою чергу, дозволяє легше пристосуватися до змінних умов передачі та забезпечує надзвичайно високу стійкість до приміщень та пошукових сигналів, викликаних багатолучовою інтерференцією, а також іншими причинами. Можливість програмувати спектр генерованих в лінії сигналів дозволяє не лише позбавитись від завад, що наводяться в лініях , але і попереджує небажані побічні електромагнітні завади провідниками ліній, наприклад, у короткочастотному діапазоні радіолюбительського мовлення.



а) **б)**

Рис.3. Спектры OFDM-сигнала з використанням FFT-перетворення (а) та Wavelet-перетворення (б)

Запропоновані алгоритми адаптації в PLC стандартах до умов поширення сигналів в електромережі, а також наявність наявних приміщень, що дозволяють знаходитись із співвідношення сигналів / приміщень, вибирають оптимальну швидкість передачі, щоб забезпечити найбільшу достовірність прийнятих даних. На рис. 3 представлені спектри OFDM-сигналів, отримані в результаті ШПФ- та Wavelet-перетворення [5, 6, 7]. Як видно з приведеного рисунка, при модуляції типу Wavelet OFDM, за порівнянням з FFT OFDM, забезпечується більша глибока частотна частота.

Висновок

1. Технологія передачі інформації по лініях електроживнення виникла на початку 20 століття і були направлені на задоволення потреб у віддаленому зборі інформації від датчиків та передачі її по існуючих проводових лініях.

2. Поточний розвиток PLC-технології багато в чому пов'язаний з появою загальноприйнятих регламентуючих стандартів і вдосконаленням відповідної елементної бази, що дозволяють створювати стійкий і завадозахищений канал зв'язку при його досить високій пропускній спроможності.

3. Існує широкий набір стандартів передачі інформації, що є наступниками один одного та розширеннями, це: HomePlug 1.0, HomePlug AV, HomePlug C&C, а також 1.4.5 HomePlug GP.

4. Технологія PLC має широке розповсюдження, проте використання сигналів FFT та Wavelet OFDM

References

1. M. S. Yousuf and M. El-Shafei. Power Line Communications: An Overview - Part I. 4th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT), pages 218–222, November 2007.

2. N. Pavlidou, A. J. Han Vinck, J. Yazdani, and B. Honary. Power Line Communications: state of the art and future trends. IEEE Com- munications Magazine, 41(4):34–40, April 2003.

3. White Paper: Comparison O f Access Technologies. - OPERA Consortium, 2009 www.ist-opera.org.

4. Gagliardo P. Take advantage of powerline communications in nextgen home networking & IPTV designs. CommsDesign, 2009.

5. IEEE Standard 1901- 2010 - IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, 2010. IEEE. Website: www.standards.ieee.org/findstds/standard/ 1901-2010.html, (20/08/2015).

6. G.9960 : Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - System architecture and physical layer specification, 2010. ITU-T. Website: www.itu.int/rec/T-REC-G.9960-200910-T/en, (20/08/2015).

7. V. Oksman and S. Galli. G.hn: The new ITU-T home networking standard. IEEE Communications Magazine, 47(10):138–145, October 2009

8. http://grouper.ieee.org/groups/1901

9. Horiaschenko K.L., Voitiuk O.P., Kushniruk S.L., Shevchuk O.V. Implementation of PLC technologies. Khmelnytskyi. Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences. 2017. Issue 2. P. 250-253

Надійшла / Paper received : 11.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНОЇ, ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-236-237
УДК 685.34

А.І. БАБИЧ, В.П. КЕРНЕШ, М.А.КАХАРОВА, А.М. ЛИТОШКО, Т.М.ПЯТЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ ШКІРЯНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЛИЦЕВИМ ПОКРИТТЯМ ПІД МЕТАЛІК В ПРОЦЕСІ РОЗРОБКИ МОДЕЛІ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ПОВСЯКДЕННОГО ЖІНОЧОГО ВЗУТТЯ

В статті досліджено фізико-механічні характеристики шкіряних матеріалів для виробництва взуття.

Наведено експериментальну перевірку якості зпроектованого і виготовленого жіночого взуття для повсякденного носіння на основі дослідження зносостійкості лицевого покриття матеріалу заготовки верху взуття в процесі поетапного зношування з поверхні базового матеріалу для виробництва виробів зі шкіри.

Доведено експериментальним шляхом високу зносостійкість покриття і матеріалу в цілому, здатність матеріалу до багаторазового згину, розтягу, мокрого і сухого тертя.

Ключові слова: *якість, зносостійкість, деформація, характеристика, покриття, натуральна шкіра, виріб.*

A. BABICH, V. KERNESH, M. KAKHAROVA, A. LITOSHKO, T.PYATENKO
Kyiv National University of Technology and Design

RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MODERN LEATHER MATERIALS WITH FACIAL METAL COATING IN THE PROCESS OF DEVELOPMENT OF MODEL MODEL

Modern fashion and European trends set the pace and vector of movement for manufacturers in relation to the use of modern materials and components, development of standard and creative designs of product models, the use of non-standard technologies, methods and means of manufacturing products of the fashion industry.

Naturally, everyone wants to emphasize their uniqueness and individuality by choosing bright colors and textures of materials in clothing, shoes and accessories, so the topical issue is the production of shoes and accessories from materials that meet color trends, and practically the requirements of standards. Therefore, in this paper we will talk about testing typical leather materials of the chrome tanning method with a black and metallic coating for physical and mechanical properties, the suitability of materials for use in the production of casual shoes and the development and manufacture of footwear based on experimental studies .

An urgent task of medium-sized enterprises and especially individual production is to study the processes and physical and mechanical properties of products and materials. These studies allow the manufacturer to research and predict in advance to ensure high stability and durability of genuine leather products during the operation of the product to avoid complaints and returns of products during the warranty period.

The aim of the work is to study the properties of leather materials of the chrome-plated method of tanning black and coated with a metal method by their experimental tests for physical and mechanical properties in order to confirm their wear resistance and strength.

Objects of research - samples of materials from real skins of cattle.

Research methods - testing of materials for tension, bending, dry and wet friction, adhesion, elongation and rupture, microscopic analysis of the material surface. Experimental quality control of developed and manufactured women 's shoes for everyday wear is presented.

The article examines the physical and mechanical characteristics of leather materials for the production of footwear.

An experimental quality control of designed and manufactured women's shoes for everyday wear is given on the basis of the study of wear resistance of the front cover of the material of the shoe upper in the process of gradual wear from the surface of the base material for leather products.

The high wear resistance of the coating and the material as a whole, the ability of the material to repeated bending, stretching, wet and dry friction have been proved experimentally.

Key words: quality, wear resistance, deformation, characteristic, covering, genuine leather, product.

Вступ

Сучасна мода і європейські тренди задають темп і вектор руху виробничникам стосовно використання сучасних матеріалів і комплектуючих, розробки типових і креативних конструкцій моделей виробів, використання не стандартних технологій, методів і засобів виготовлення виробів індустрії моди.

Природньо, що кожна людина хоче підкреслити свою неповторність і індивідуальність обираючи яскраві кольори і фактури матеріалів в одязі, взутті і аксесуарах, тому актуальним питанням є виробництво взуття та аксесуарів з матеріалів, які відповідають колористично модним тенденціям, а практивно вимогам стандартів. Тому в даній роботі мова буде йти про перевірку типових шкіряних матеріалів хромового методу дублення з покриттям чорного кольору і під металік на фізико-механічні властивості, про придатність матеріалів до використання у виробництві повсякденного взуття і про розробку та виготовлення моделі взуття на основі експериментальних досліджень властивостей матеріалів.

Постановка завдання

Актуальним завданням підприємств, середньої потужності і особливо індивідуального виготовлення є дослідження процесів та фізико-механічних властивостей виробів і матеріалів. Дані

дослідження дають можливість виробнику дослідити і заздалегідь спрогнозувати забезпечення високої формостійкості і зносостійкості виробів з верхом із натуральних шкіряних матеріалів під час експлуатації виробу, уникнути рекламацій і повернень виробів в період терміну гарантійного носіння.

Найбільш вагомими властивостями шкіряних матеріалів крім формувальних, які в певній мірі визначають якість і відповідність виробів до вимог стандартів є деформаційні властивості і зносостійкі. Величина і характер деформації виробу або його деталей напряму залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів. Дані експериментальні дослідження дають можливість припустити забезпечення високої якості і зносостійкості виробів з верхом із натуральних шкіряних матеріалів під час експлуатації.

Аналіз праць науковців різних поколінь у цьому напрямку [1-3] дозволяють сучасним дослідникам припустити, що матеріали даної групи мають здатність до багаторазових деформацій (згинання, розтягнення, формування), не втрачаючи при цьому якості і конкретно зовнішнього вигляду. Однак, дана гіпотеза має бути перевірена і підтверджена експериментально, оскільки зміна властивостей шкіри під час експлуатації виробу суттєво впливає на процеси виробництва, експлуатації, зберігання і ремонту виробу.

Метою роботи є дослідження властивостей шкіряних матеріалів хромового методу дублення чорного кольору і з покриттям під металік шляхом їх експериментального випробування на фізико-механічні властивості з метою підтвердження їх зносостійкості і міцності.

Об`єкти досліджень – зразки матеріалів з натуральних шкір ВРХ.

Методи досліджень – випробування матеріалів на розтяг, на згин, на сухе і мокре тертя, на адгезію, на видовження і розрив, на мікроскопічний аналіз поверхні матеріалу.

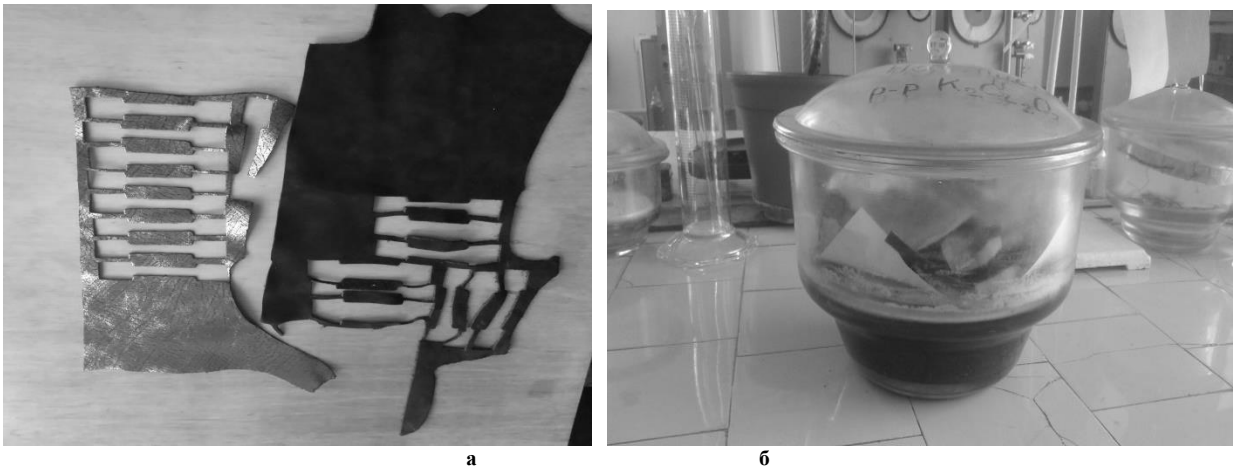
Основна частина

Для проведення даного дослідження обрано два зразки натуральних шкіряних матеріалів: один-з лицевим покриттям чорного кольору, який є найбільш вживаним на виробництві; другий-з лицевимпокриттям під металік, за бажанням замовника взуття. Дослідження проводились в лабораторії кафедри «Шкіри та хутра», КНУТД.

Для успішного проведення дослідження, згідно стандартних методик описаних в ДСТУ ISO 5404:2007 «Шкіра. Фізико-механічні випробування.**»(чинний з 01.07.2009р.)**, вибрано матеріал №1 вітчизняного виробництва - ялівку, що виробляє завод «Чинбар», м. Київ і матеріал №2- з покриттям під металік турецького виробника [4-5].

Для проведення досліджень всі зразки згідно стандартизованої методики викроюють з матеріалу різаком «лопаточка» і «круг». Після чого на протязі доби (24 годин) витримують в ексикаторі для стабілізації, після чого проводять поетапно дослідження на різні групи фізико-механічних властивостей. (рис.1).

Наступним етапом для дослідження матеріалів верху на розтяг, ГОСТ 938.11 «Кожа. Метод испытания на растяжение», відібрано 8 зразків[6,7]. Випробування проводились на зразках, що мають форму двосторонньої лопаточки. Згідно методики досліджень зразки мають довжину робочої ділянки 50 мм і ширину 10 мм. Випробуванням на розтяг піддавали по чотири зразки шкіри ВРХ, №1 і №2: два поздовжніх і два поперекових. Перед випробуванням робочу частину зразка поділяють прямими поперековими лініями по «тілу» зразка на п'ять рівних за розміром ділянок, які нумерують порядковими номерами з 1 по 5, після цього виміряють товщину кожної ділянки товщиноміром.



а **б**

Рис. 1. Підготовка зразків матеріалів до випробувань на фізико-механічні характеристики
а – розкрій зразків; б- витримка в ексикаторі.

Після витримки зразків у нормальних умовах (ексикатор), досліджувані зразки шкіри поштучно закріплюють в затискачах розривної машини РТ-250, щоб його геометрична вісь збігалася з серединами затискачів, а лінії, що обмежують робочу ділянку з їх гранями (рис.2). Перед випробуванням стрілки-покажчики шкали навантажень і шкали подовжень повинні знаходитися на нульовій поділці. При включенні

електродвигуна нижній затискач з допомогою силової пари гвинт – гайка опускається вниз і через зразок тягне за собою верхній затиск. При цьому зразок подовжується. Рух верхнього затискача через важільну передачу відхиляє вантаж маятника, створюючи відповідне зусилля розтягування. Величина зусилля з допомогою зубчастої рейки, шестерні і укріпленої на одній осі з нею стрілки фіксується на шкалі навантажень. Коли зусилля збільшиться настільки, що станеться розрив зразка, маятник з вантажем плавно повернеться до свого початкового положення. До нульового поділу повернеться і стрілка шкали навантажень. Подовження зразка фіксується в міліметрах за шкалою подовжень[6].

Межа міцності при розтязі зразків визначається за формулою:

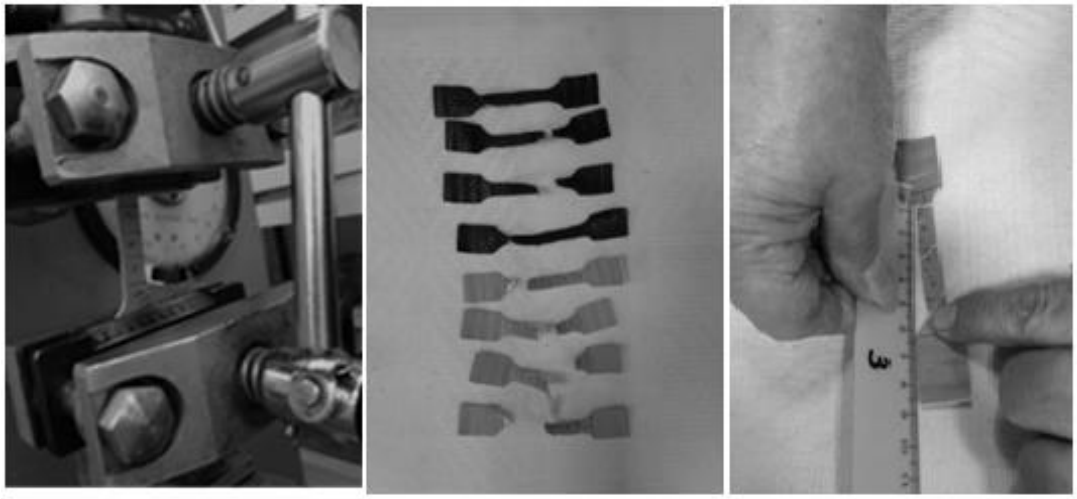
$$\sigma = \frac{P}{F}, \tag{1}$$

де P – навантаження при розриві, Н;

F – площа поперечного перерізу зразка в місці розриву, м².

Результати експериментальних досліджень зразків шкіряних матеріалів на розтяг представлено в таблиці 1, а на видовження в таблиці 2.

Визначення стійкості покриття шкіряних зразків до багаторазового згину визначалося згідно методики за ГОСТ 13868 «Кожа хромовая для верха обуви». Метод определения устойчивости покрытия к многократному изгибу. Результати лабораторних досліджень представлено в таблиці 3. Стійкість покриття на шкірі до багаторазового згину і вигину визначались на приладі ІПК-2. Цей показник характеризується кількістю вигинів зразка до появи дефектів на покритті[8].



а **б** **в**

Рис. 2. Випробуваня зразків на розтяг, розривна машина РТ-250
а – візуалізація досліджуваного об'єкта; б, в- оцінка результатів дослідження.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень зразків шкіряних матеріалів на розтяг

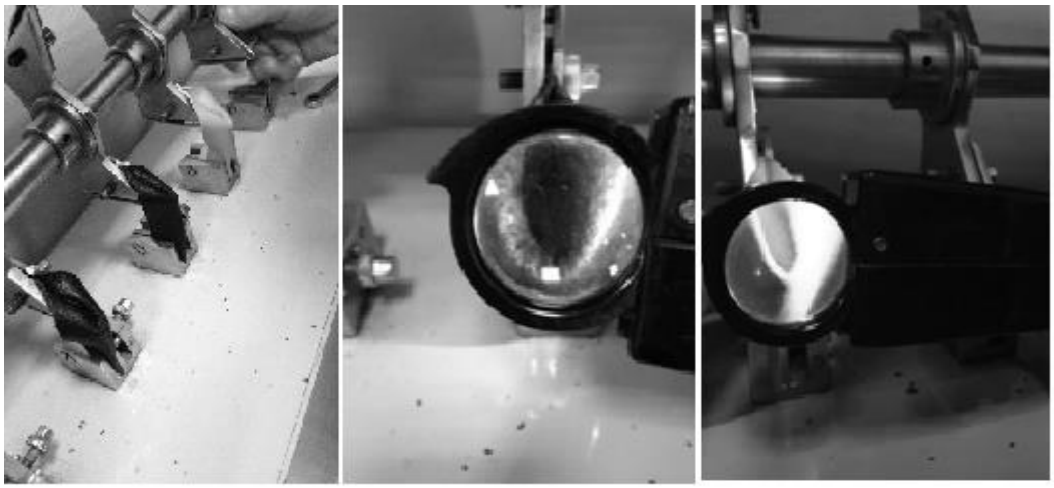
№ п/п	Шкіра хромового методу дублення	Товщина, мм					Середня товщина, мм	Середня площа, мм²
		1	2	3	4	5		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Зразок №1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,06	10,6
2	Зразок №1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	10,0
3	Зразок №1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,02	10,2
4	Зразок №1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,08	10,8
5	Зразок №2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,18	11,8
6	Зразок №2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,1	1,16	11,6
7	Зразок №2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,16	11,6
8	Зразок №2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,18	11,8

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень зразків матеріалів на видовження матеріалу при різному навантаженні

№ п/п	Шкіра хромового методу дублення	Навантаження при розриві допустимі за ГОСТ, МПа	Видовження, мм			
			При навантаженні 9,8 * (4,9) МПа	При розриві	Залиш кове	Місце розриву, кількість розривів/тріщин
1	2	3	4	5	6	7
1	Зразок №1	19,4	18	34	13	1
2	Зразок №1	25,8	18	34	8	2
3	Зразок №1	24,8	15	32	8	1
4	Зразок №1	12,8	20	26	6	2
5	Зразок №2	24,0	30	26	10	1
6	Зразок №2	15,2	32	38	15	2
7	Зразок №2	24,0	18	28	10	4
8	Зразок №2	28,8	14	27	10	3

Для випробування із стандартної ділянки шкіри вирізають зразки прямокутної форми розміром 45×80 мм і витримують їх протягом доби (24 години) в ексикаторі над сірчаною кислотою. Потім кожен зразок згинають по середині в повздовжньому напрямку, вставляють у верхній затискач приладу і фіксують гвинтом. Частину зразка яка розташована над затискачем, відвертають до низу і заводять за затискач так, щоб край вигину спадав вертикально вниз. Вільний кінець зразка без натягу заправляють у нижній затискач і щільно затискають гвинтом (рис.3,а). Перевірку якості лицевої поверхні зразків шкір проводять при вимкненому приладі і додатковому освітленні за допомогою лупи - окуляру(рис.3.б,в). Зразки взято по два з вожної партії, які викроєно у вздовж і в поперек. Результати дослідження представлено в таблиці 3.



а **б** **в**

Рис.3. Випробування зразків на стійкість до багаторазового згинання, прилад ІПК-2
а – візуалізація процесу згинання зразків на приладі ; б,в - мікроскопічний аналіз зразків НШ

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень зразків матеріалів на визначення стійкість до багаторазового згинання

№ п.п	Зразок шкіри	Поява тріщин, об
1	2	3
1	Зразок №1	Більше 15500
2	Зразок №1	Більше 15500
3	Зразок №2	Більше 15500
4	Зразок №2	Більше 15500

Визначення стійкості покриття зразків до сухого та мокрого тертя проведено згідно ГОСТ 938.29 «Кожа. Метод испитания устойчивости окраски к сухому и мокрому трению» та представлено в таблиці 4. [9]

Метод визначення стійкості покриття на зразках натуральної шкіри з різним покриттям до сухого і мокрого тертя полягає в стиранні лицевої поверхні зразка шкіри до порушення покриття. Визначення цього

показника проводять на приладі ІПК-1 (рис. 4). Досліджувані шкіряні зразки мають форму кола діаметром 40 мм. Перед проведенням випробування зразок (діаметром 25 мм) повсті витримують у воді при кімнатній температурі не менше 4 годин. Намокла повсть підсушують наступним чином: на фільтрованому папері (8 шарів) розкладеному на столі приладу кладуть намочений зразок повсті і на нього опускають шпиндель терміном на 3 с. для віддачі лишку вологи на папір. Потім підсушений зразок повсті вставляють у паз шпинделя.

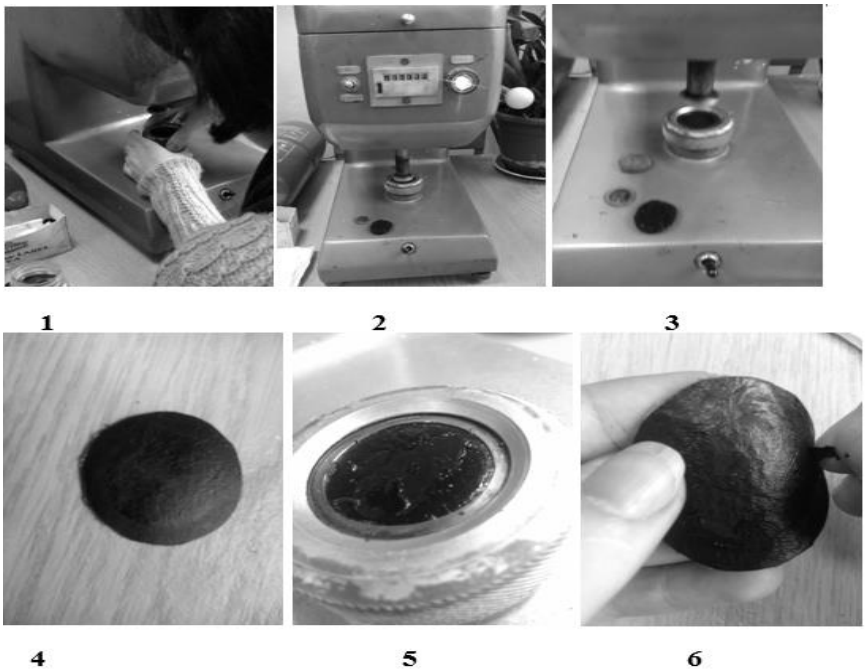


Рис. 4. Визначення стійкості покриття шкіряного матеріалу до дії мокрого та сухого тертя: 1 – встановлення зразка на шпиндель машини ІПК – 1; 2 – проведення досліду; 3 – руйнування поверхні зразка після 100 обертів; 4 – руйнування поверхні зразка після 500 обертів; 5,6 – руйнування поверхні зразка (відшарування покривної плівки) після мокрого тертя, 40 обертів.

Досліджувані шкіряні зразки закріплюють на столі приладу. На закріплений зразок шкіри опускають шпиндель з повстю. Встановлюють лічильник на 0 і включають прилад. Випробування проводять без додаткового навантаження на шпиндель. Зразки перевіряють через кожні 100 обертів, для емульсійного покриття через кожні 20 обертів, періодично міняючи напрям обертання шпинделя. Випробування закінчують при появі першої ознаки порушення покриття. При відсутності порушення покриття випробування припиняють після 500 обертів, для шкір з нітроемульсійним покриттям і після 200 обертів, для шкір з емульсійним покриттям[10].

Таблиця 4

Результати експериментальних досліджень зразків матеріалів на визначення стійкості покриття до дії тертя

№ п.п	Шкіра	Кількість обертів машини
1	**2**	**3**
Сухе тертя		
1	Зразок №1	Більше 500
2	Зразок №1	Більше 500
3	Зразок №2	450
4	Зразок №2	300
Мокре тертя		
1	Зразок №1	Більше 200
2	Зразок №1	Більше 200
3	Зразок №2	190
4	Зразок №2	40

Адгезія покривної плівки зразків шкіряних матеріалів визначалась згідно п.6, ГОСТ 939. «Шкіра для верху взуття. Технічні умови.» на машині РМ-3 [11]. Даний метод дозволяє визначити адгезію емульсійного та нітроемульсійного покриття на шкірі для верху взуття хромового методу дублення (рис 5). Результати даного дослідження представлено в таблиці 5, а розрахунки в таблиці 6.

а б в г

Рис.5. Визначення адгезії покривної плівки матеріалу:
а – розмітка на зразки; б – фіксація зразка в затискачах машини РМ-3; в – визначення навантаження при дослідженні адгезії покриття; г – зразки після проведення дослідження.

Таблиця 5

Адгезія покривної плівки

№ зразка	Навантаження при розшаруванні на кожній з ділянок, г/см			
	1	2	3	4
1	0,22	0,28	0,28	0,28
1	0,38	0,38	0,38	0,38
1	0,34	0,48	0,48	0,48
1	0,64	0,64	0,64	0,64
2	0,2	0,2	0,18	0,18
2	0,16	0,18	0,18	0,2
2	0,3	0,28	0,28	0,28
2	0,3	0,3	0,3	0,3

Згідно п.6, ГОСТ 939 розраховуємо адгезію лицьового покриття шкіри хромової, ялівки середньої за формулою:

$$A = \frac{P_{ср}}{a}, \quad (2)$$

де $P_{ср}$ – середнє навантаження при відшаруванні покриття, визначається як середньоарифметичне значення всіх навантажень, отриманих при дослідженні зразка, Н;

а – ширина зразка шкіри, м.

Таблиця 6

Відповідність адгезії покриття вимогам ГОСТ ISO 11644 -2013 (Метод визначення адгезії покриттів)

№ зразка	Середнє навантаження 0,1кг/см	Характер розриву	Адгезія Н/м	Дозволено ГОСТ ISO 11644 -2013, Н/м
1	0,318	по місцю склеювання	318	200
1	0,543	по місцю склеювання	543	200
1	0,185	по місцю склеювання	185	200
1	0,278	по місцю склеювання	278	200
2	0,64	відрив покривного шару, без пошкодження лицьової поверхні	640	200
2	0,253	по місцю склеювання	253	200
2	0,513	відрив лицьової поверхні зі шкіри з пошкодженням поверхні	513	200
2	0,516	відрив лицьової поверхні зі шкіри з пошкодженням поверхні	513	200

За результатами досліджень проведено порівняльну оцінку отриманих результатів за стандартними показниками зазначеними в ГОСТ 939 «Кожа для верха обуви. Технические условия». Після проведення спектру досліджень на фізико-механічні властивості шкіряних матеріалів з покриттям можна зробити

висновок про те, що оцінка якості шкіри за величинами стандартизованих показників проведена. Визначено, що досліджувані матеріали в цілому відповідають вимогам стандартів хоча і є деякі відхилення за певними показниками. Адгезія покривної лицьової плівки відповідає вимогам стандарту. Невідповідність зразків матеріалу №2 можна пояснити тим, що клей погано абсорбувався в покривну плівку зразка. Також зразок №2 має низький показник стійкості до тертя, цей факт вказує на те, що у готових виробах буде спостерігатися швидке стирання покриття матеріалу в місцях внутрішньої частини п'яти виробу і в носковій частині взуття.

В цілому якість досліджуваних шкіряних матеріалів характеризують показники в комплексі, а саме: хімічний аналіз на вміст хімічних речовин, мікроскопічний аналіз, фізико-механічний аналіз, органолептичний аналіз.Після проведення досліджень і підтвердження зносостійкості покриття на шкірі, за ескізами виготовлено дослідний зразок взуття (рис.6).

Рис.6. Візуалізація дослідного зразка взуття з досліджуваних матеріалів

Висновки

За результатами досліджень на фізико-механічні характеристики зразків матеріалу на: на одноосне розтягнення, на згин, на сухе і мокре тертя, на видовження і розрив, на мікроскопічний аналіз поверхні матеріалу, на адгезію лицевої плівки покриття матеріалу встановлено, що досліджувані зразки є зносостійкими в межах стандартизованих величин, про що говорять табличні дані результатів експериментальних досліджень.

Зпрогнозовано забезпечення високої зносостійкості виробів виготовлених з досліджуваних натуральних шкір. Доведено експериментальним шляхом доцільність даних робіт.

Література

1. Козарь О. П. Оцінка показників формостійкості шкір, модифікованих органічно-мінеральними композиціями / О. П. Козарь, О. Р. Мокроусова, Т. М. Віктор // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ, 2013. – Вип. 41. – С. 135-137.

2. Kozar O. P. Deformation characteristics of leather for shoe upper, filled with natural minerals / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, B. Wozniak // Journal of Chemistry and Chemical Engineering (USA). – 2014. – № 8. – P. 47-53. –ISSN 1934-7375.

3. Козарь, О. П. Оцінка релаксаційно-деформаційних характеристик шкір для верху взуття, наповнених природними мінералами / О.П. Козарь, О. Р. Мокроусова, В. П. Коновал // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 4. – С. 107-115.

4. Рибальченко В.В., Коновал В.П., Дрегуляс Е.П. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Методи випробувань: Навчальний посібник. – К. : КНУТД, -2010. -395с.

5. Бабич А.І. Дослідження фізико-механічних характеристик шкіряних матеріалів декорованих петриківським розписом в процесі виготовлення та експлуатації взуття і аксесуарів / Бабич А.І., Кернеш В.П. // Вісник Хмельницького національного університету – 2019. – №6 (269) : Серія "Технічні науки".– 82-90с.

6. Гаркавенко С.С. Дослідження фізико-механічних характеристик шкіряних матеріалів при виготовленні і експлуатації виробів / Гаркавенко С.С., **Бабич А.І.**, Долженко М.В. // Електронний ресурс//Технології та дизайн-2017.-№1-Режим доступу:http://nbuv.gov.ua/UJR N/td 2017.

7. ДСТУ ISO 5404:2007 Шкіра. Фізико-механічні випробування.

8. ГОСТ 938.11 Кожа. Метод испытания на растяжение.

9. ГОСТ 13868 Кожа хромовая для верха обуви. Метод определения устойчивости покрытия к многократному изгибу.

10. ГОСТ 939 Кожа для верха обуви. Технические условия.

11. ГОСТ 938.29 Кожа. Метод испитания устойчивости окраски к сухому и мокрому трению.

References

1. Kozar OP Estimation of indicators of shape stability of skins modified with organic-mineral compositions / OP Kozar, OR Mokrousova, TM Victor // Scientific notes. - Lutsk: LNTU, 2013. - Issue. 41. - P. 135-137.

2. Kozar O. P. Deformation characteristics of leather for shoe upper, filled with natural minerals / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, B. Wozniak // Journal of Chemistry and Chemical Engineering (USA). - 2014. № № 8. R. 47-53. –ISSN 1934-7375.

3. 3.Kozar, OP Estimation of relaxation and deformation characteristics of leather for shoe uppers filled with natural minerals / OP Kozar. Kozar, OR Mokrousova, VP Konoval // Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. - 2013. - № 4. - P. 107-115.

4. Ribalchenko VV, Konoval VP, Dregulyas EP Materials science of light industry products. Test methods: Textbook. - K.: КНУТД, - 2010. -395c.

5. Babich AI Research of physical and mechanical characteristics of leather materials decorated with Petrykivka painting in the process of manufacturing and operation of shoes and accessories / Babich AI, Kernesh VP // Bulletin of Khmelnytsky National University - 2019. - №6 (269): Series "Technical Sciences" .– 82-90c.

6. Garkavenko SS Research of physical and mechanical characteristics of leather materials in the manufacture and operation of products / Garkavenko SS, Babych AI, Dolzhenko MV // Electronic resource // Technologies and design-2017.-№1-Access mode: http: //nbuv.gov.ua/UJR N / td 2017.

7. DSTU ISO 5404: 2007 Leather. Physico-mechanical tests.

8. GOST 938.11 Leather. Tensile test method.

9. GOST 13868 Chrome leather for shoe uppers. Method for determining the resistance of the coating to repeated bending.

10. GOST 939 Leather for shoe uppers. Technical conditions.

11. GOST 938.29 Leather. Method of testing the resistance of paint to dry and wet friction.

Надійшла / Paper received : 19.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-244-245
УДК 685.34

С.С. ГАРКАВЕНКО, А.І. БАБИЧ, О.А. ОХМАТ, Т.М. ЛИПСЬКИЙ
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ОЗДОБЛЮВАННЯ ШКІРЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ КРАСТ

В статті досліджено показники якості композиції для оздоблювання шкіряного напівфабрикату КРАСТ.

За результатами теоретичних досліджень проведено ряд експериментальних випробувань композицій для доведення практичної значимості роботи, а саме випробування на: визначення сухого залишку, визначення pH дисперсії полімерів, визначення загущення латексу при дії гідроксиду амонію, отримання вільної плівки, визначення загущення латексу при дії електролітів, визначення вмісту мінеральних речовин, визначення усмоктувальної здатності поверхні шкіри, визначення повітропроникності шкіряного напівфабрикату та шкіри з покриттям, визначення товщини покриття на шкірі ваговим методом, дослідження властивостей покриття на шкірі.

Доведено есперимента́льним шляхом високу якість і зносостійкість композиції для оздоблювання красту, нанесених на напівфабрикат і на готові вироби вироблені з нього.

Досліджено процеси поетапного стирання композиції з поверхні базового матеріалу для виробництва виробів зі шкіри та інші характеристики. Зпрогнозовано забезпечення високої якості і зносостійкості композиції нанесеної на взуття та аксесуар, вироблених з натуральної шкіри краст.

Перевірено і доведено експериментальним шляхом відповідність композиції нанесеної на натуральний шкіряний напівфабрикат краст до мокрого і сухого стирання та інших властивостей покриття на шкірі.

Ключові слова: *зносостійкість, якість, композиція, характеристика, гнучкість, властивість, плівка, шкіра, виріб, напівфабрикат.*

S. GARKAVENKO, A. BABICH, O. OKHMAT, T. LIPSKY
Kyiv National University of Technology and Design

RESEARCH QUALITY INDICATORS OF COMPOSITION FOR FINISHING LEATHER SEMI-FACTORY

The article investigates the quality indicators of a composition for finishing a leather semi-finished product of KRAST. According to the results of theoretical studies, a number of experimental tests of the compositions to prove the practical significance of the work, namely the test for: determination of dry residue, determination of the pH of the dispersion of polymers, the determination of latex thickening under the action of ammonium hydroxide, obtaining a free film, the determination of latex thickening under the action of electrolytes, determination of the content minerals, determination of skin surface absorption capacity, determination of air permeability of leather semi-finished product and coated skin, determination of the thickness of the coating on the skin by weight method, the study of the properties of the coating on the skin.

The high quality and durability of the composition for finishing the scab applied to the semi-finished product and to the finished products made from it have been proven experimentally.

The processes of stepwise erasure of the composition from the surface of the base material for the production of leather products and other characteristics were investigated. It is envisaged to provide high quality and durability of the composition applied to the shoes and accessories made of genuine leather scab.

The suitability of the composition applied to the natural leather semi-finished product of scabs for wet and dry abrasion and other properties of the coating on the skin was tested and proved experimentally.

Keywords*: durability, quality, composition, characteristic, flexibility, property, film, leather, product, semi-finished product.*

Вступ

В сучасному світі технологій і моди, кожна людина хоче підкреслити свою індивідуальність, тому актуальним питанням є виробництво ексклюзивних виробів і зокрема взуття та аксесуарів сучасних, технологічних, комфортних і ексклюзивних. Ексклюзивність виробу може бути досягнута різним шляхом, а саме: конструктивним (розробка цікавої і надсучасної конструкції виробу), технологічним (виробництво виробу за допомогою інноваційної технології з сучасних матеріалів), оздоблювальним (нанесенням на матеріал або готовий виріб композицій для зміни властивостей і кольору матеріалу), декоруванням (нанесенням на матеріал чи готовий виріб малюнку, тиснення, перфорації тощо).

За допомогою оздоблення і декорування виробів досягається ефект їх осучаснення, кольорової гами, певних властивостей і зокрема зносостійкості, водонепроникності тощо. Тому в даній роботі мова буде йти про процеси оздоблення і наповнення матеріалу і виробів сучасними хімічними композиціями, а також про здатність матеріалу залишатися придатним до використання, а значить і зносостійким і естетично привабливими тривалий час.

Постановка завдання

Актуальним завданням підприємств різної потужності, які спеціалізуються на виробництві виробів зі шкіри серійно чи за індивідуальним замовленням, є дослідження хімічних та фізико – механічних процесів в композиціях і показників якості композиції для наповнення і оздоблення натуральних шкіряних матеріалів.

Дані дослідження дають можливість в подальших роботах дослідити властивості матеріалів і спрогнозувати забезпечення високої формостійкості, водостійкості і зносостійкості виробів з верхом із

натуральних шкіряних матеріалів наповнених композиціями під час експлуатації виробу.

Найбільш вагомими властивостями шкіряних матеріалів, які в значній мірі визначають якість виробів і якість виконання основних технологічних операцій виробництва взуття, є деформаційні властивості. Величина і характер деформації виробу або його елементів залежить не тільки від способу виготовлення, кваліфікації робітника і якості інструментів, що використовуються, але і від фізико-механічних властивостей матеріалів. Дані дослідження дають можливість припустити забезпечення високої якості і зносостійкості виробів з верхом із натуральних шкіряних матеріалів як при експлуатації, ремонту і вдосконалення виробу.

Праці сучасних науковців у даному напрямку [1-3] дозволяють нам припустити, що матеріали даної групи мають здатність до багаторазових деформацій (згинання, розтягнення, формування, стискання, тертя, водовідштовхування тощо), не втрачаючи при цьому якості.

Однак, дана гіпотеза має бути перевірена і підтверджена експериментальним шляхом, оскільки зміна властивостей шкіри під час експлуатації виробу з елементами оздоблення у вигляді нанесених на поверхню матеріалу чи виробу композицій суттєво впливає на технологічні процеси виробництва, експлуатації, зберігання і ремонту виробу.

Метою роботи є дослідження характеристик і властивостей композицій, шляхом їх випробування з метою підтвердження їх відповідності до вимог стандартів.

Об`єкти досліджень – процес випробування композиції для наповнення і оздоблення натуральних матеріалів і виробів з натуральних шкір красту, для доведення практичної значимості роботи.

Методи досліджень – випробування матеріалів на визначення сухого залишку, визначення pH дисперсії полімерів, визначення загущення латексу при дії гідроксиду амонію, отримання вільної плівки, визначення загущення латексу при дії електролітів, визначення вмісту мінеральних речовин, визначення усмоктувальної здатності поверхні шкіри, визначення повітропроникності шкіряного напівфабрикату та шкіри з покриттям, визначення товщини покриття на шкірі ваговим методом, дослідження властивостей покриття на шкірі.

Основна частина

Для дослідження було обрано готову композицію (виробництво Італія), яку виробник може придбати у вільному продажу і використовує для наповнення і оздоблення шкіряного матеріалу чи готового виробу.

а **б**

Рис.1 Візуалізація об'єктів дослідження
а - досліджуєма композиція; б – готовий виріб (краст + композиція)

Характеристика композиції:

- колір зелений смарагдовий;
- консистенція рідина;
- запах різкий та леткий, важкої органіки;
- питома вага: 0,8 г/см^3;
- у воді не розчиняється; потрапляючи у воду одразу утворює плівку;
- рекомендації: робота у засобах захисту дихальних шляхів.

Для дослідження, згідно методик описаних в ISO 17075 **(ГОСТ** 4.11-81 «Система показників якості продукції») вибрано найбільш вагомі показники і проведено дослідження [1-3].

Визначення сухого залишку. Визначення сухого залишку передбачає попереднє висушування та тарування бюксу на аналітичних вагах. У відтарований бюкс зважують 3–5 г дисперсії на аналітичних вагах. Бюкс з відкритою кришкою сушать у сушильній шафі за температури 105 ± 5°C до постійної маси. Вміст сухого залишку ***СЗ*** розраховують за формулою, %:

$$СЗ = (a - a_1) \cdot 100/H, \quad (1)$$

де a – маса бюксу з висушеною дисперсією, г;

a_1 – маса пустого бюксу, г;

H – наважка дисперсії, г.

Вміст сухого залишку складає 5,98 %.

Визначення pH дисперсії полімерів. Змішування латексів із значенням pH, що різко відрізняються один від одного небажано. Використання латексів, наприклад, з pH=3 та pH=9 може викликати повну або часткову коагуляцію. Не можна змішувати аніоноактивні латекси з катіоноактивними.

Рівень pH досліджуваної композиції 5,8 – 6,0.

Визначення загущення латексу при дії гідроксиду амонію. Загущення латексу при дії гідроксиду амонію визначають з метою прогнозування поведінки плівкоутворювального матеріалу у покривних фарбах, значення pH яких вище 7. Крім того стійкість до загущення аміаком визначає чистоту (дисперсність) та колоїдно-хімічні властивості плівкоутворювального матеріалу, які забезпечують найбільш сприятливі умови його застосування.

Для визначення цього показника готують 5 пробірок, в кожну з яких наливають по 15 мл дисперсії та починаючи з другої пробірки додають по 0,2 мл: дистильованої води, 6,25%-го, 12,5%-го та 18,75%-го розчину гідроксиду амонію. Після нетривалого перемішування проби витримують протягом 10 хв., визначають в'язкість за температури 25°С. Отримані дані (середнє значення з трьох вимірів) подають у вигляді таблиці.

В'язкість розраховують за формулою по середньому (з трьох вимірів) часу витікання рідини. Відносна в'язкість являє собою відношення часу витікання розчину до часу витікання розчинника.

Таблиця 1

Результати дослідження по визначенню загущення латексу при дії гідроксиду амонію.

Розчин	Час витікання, с		Відносна в'язкість ($\eta_в$)
	Води (t_o)	Розчину(t)	
Вода дистильована	1,24		
13%-а дисперсія		1,52	1,23
13%-а дисперсія + вода		1,68	1,35
13%-а дисперсія + 6,25%		1,72	1,36
13%-а дисперсія +12,5%		2,28	1,84
13%-а дисперсія + 18,75%		3,86	3,11

Спостереження: Досліджувана покривна композиція стійка до додавання гідроксиду амонію, що, в свою чергу, свідчить про її стійкість у широкому діапазоні лужного pH. Коагуляції досліджуваної композиції в дослідженні не спостерігалось.

Відзначалось незначне помутніння при найбільшій концентрації гідроксиду амонію, що свідчить про початок загущення дослідної композиції.

Отримання вільної плівки. Плівки з дисперсій та інших зв′язуючих речовин отримують товщиною 0,2 мм. На чисту, протерту спиртом, встановлену у точно горизонтальному положенні, скляну пластинку наливають необхідну кількість дисперсії полімеру. За допомогою скляної палички, що має на кінці кільце з дроту діаметром 0,2 мм, розрівнюють дисперсію по поверхні скла та залишають для сушіння при кімнатній температурі. Відокремлюють плівку від скла. При необхідності її зволожують марлевим тампоном. Плівку зволожену марлевим тампоном підсушують протягом 24 год при кімнатній температурі, виконують кондиціонування при температурі 20±0,5°С та відносній вологості 65% протягом 24 год.

Спостереження: отримати вільну плівку необхідної товщини не вдалось. Досліджувана покривна композиція міцно прикріплювалась до будь якого матеріалу, на якому намагались відливати плівку. Зняти після висихання плівку в цілому вигляді не вдалось, вона відривалась з підложки із значним зусиллям.

Визначення загущення латексу при дії електролітів. Відомо, що дисперсії (латекси) плівкоутворювачів вміщують значну кількість поверхнево-активних речовин (ПАР) та речовин (стабілізатори), що підвищують вміст ПАР на поверхні глобул плівкоутворювача. При певних умовах кількість захисних речовин на поверхні глобул може зменшитись, внаслідок чого сорбційна стійкість при певних концентраціях електролітів в латексах падає, відбувається загущення та коагуляція плівкоутворювача. Тому необхідно мати характеристику сорбційної стійкості латексів та знати pH, при якому відбувається коагуляція латексу.

Для визначення сорбційної стійкості досліджуваний плівкоутворю-вальний матеріал наливають у сім пробірок по 10 мл і додають необхідний об'єм розчину електроліту. В якості електролітів використовують 1н розчини хлориду кальцію, гідроксиду амонію, хлориду натрію, сульфату амонію, сульфату алюмінію, оцтової та соляної кислот. Електроліт додають із бюретки по 0,5 мл і поступово доводять його об'єм до 10 мл. Після кожного додавання електроліту пробірку струшують і залишають на 8…10 хв. Далі відмічають зміни, які сталися з вмістом кожної пробірки (зміна густини, розшарування, коагуляція тощо). При відсутності помітних змін додають чергові порції електроліту у пробірку. При виявленні певних змін визначають pH суміші та об'єм електроліту, при якому ці зміни сталися.

Спостереження: в дослідженні порогу коагуляції не виявлено. Досліджувана композиція стійка до вказаних електролітів.

Визначення вмісту мінеральних речовин. Визначення мінеральних речовин проводять шляхом прожарювання підсушеної наважки пігментного концентрату у муфельній печі при температурі 700°С.

2–3 г пігментного концентрату зважують з похибкою не більшою 0,0002 г, вміщують у прожарений до постійної маси та зважений фарфоровий тигель. Тигель з наважкою спочатку підсушують на піщаній бані, потім ставлять у холодну муфельну піч. Прожарювання проводять при 700°С протягом 2 год. Потім тигель охолоджують у ексикаторі з прожареним хлоридом кальцію та зважують на аналітичних вагах. Наступні прожарювання проводять до отримання постійної маси. Вміст мінеральних речовин МР,%, визначають за формулою:

$$МР = (a - a_1) \cdot 100/H, \quad (2)$$

де a – маса тигля з прожареним концентратом, г;

a_1 – маса тарованого прожареного тигля, г;

H – наважка пігментного концентрату, г.

За результат дослідження приймають середнє арифметичне двох паралельних досліджень. Відхилення між результатами не повинне перевищувати 1%.

Результат аналізу: Вміст мінеральних речовин складає 5,95 %.

Визначення усмоктувальної здатності поверхні шкіри. Усмоктувальна здатність поверхні визначає час усмоктування у шкіру краплини води, нанесеної на її поверхню.

Спостереження: для дослідження використано шкіряний напівфабрикат КРАСТ після жирування та висушування. Напівфабрикат хромового дублення, наповнений рослинними та синтетичними дубителями.

Час всмоктування краплі дистильованої води поверхнею напівфабрикату складає 25 хвилин.

Час всмоктування дослідної покривної композиції поверхнею напівфабрикату складає в середньому 14 секунд. Це ще раз свідчить про наявність в композиції органічних розчинників, що прискорюють всмоктування покривної композиції.

Нанесення покривної фарби на поверхню шкіри. Покривна фарба на шкіру в лабораторних умовах наноситься в декілька прийомів. Нанесення здійснюють щіткою намазним методом. Після кожного нанесення зразок шкіри підсушують над електроплиткою або в сушильній шафі, після двох послідовних нанесень зразок шкіри пресують.

Спостереження: Повної покривності за умови використання щіткового методу нанесення покривної композиції досягнуто за 6 проходів. Напівфабрикат став жорсткішим. На поверхні напівфабрикату видимий шар покриття не сформовано. Композиція дифундувала в середину дерми на товщину, приблизно рівну 1/3 товщини всього напівфабрикату (визначено за допомогою світлового мікроскопу).

Усмоктувальна здатність поверхні оздобленого напівфабрикату різко знизилась. Крайовий кут змочування для краплі води складає більше 90° (візуальне спостереження), а час її всмоктування становить більше 1,5 годин.

Багатошарове нанесення покриття підвищило гідрофобні властивості поверхні шкіри, що створило більш сприятливі умови для експлуатації взуття у вологих умовах.

Рекомендовано визначити водопромокання у динамічних умовах виробничих зразків шкіри.

Визначення повітропроникності шкіряного напівфабрикату та шкіри з покриттям. Повітропроникність шкіряного напівфабрикату характеризує його здатність пропускати повітря при певній різниці тиску з обох боків зразка. Повітропроникність шкіряного напівфабрикату тісно пов'язана з його пористістю, тобто з методами вироблення шкіри.

Показником повітропроникності шкіряного напівфабрикату є об'єм повітря в сантиметрах кубічних, що проходить через 1 см^2 площі досліджуваного зразка протягом 1 год при різниці тиску з обох боків зразка в 100 мм вод. ст. (см^3/см^2·год).

Абсолютну повітропроникність B_A розраховують за формулою:

$$B_A = t - t_o, \quad (3)$$

де t – час, що витрачається на пропускання 100 см^3 повітря, с;

t_o – час витікання 100 см^3 води з приладу без зразка, с.

Кінцевий результат підраховують як середнє арифметичне з двох визначень.

Відносну повітропроникність $B_в$ розраховують за формулою:

$$B_в = \frac{V \cdot 3600}{SB_A}, \quad (4)$$

де V – об'єм повітря, який пройшов через зразок (за умовами випробувань 100 см^3);

S – площа зразка, см^2;

B_A – абсолютна повітропроникність, с.

Спостереження: показник абсолютної повітропроникності для напівфабрикату КРАСТ до його оздоблювання складав 35,6 с, а відносної – 431,7 (см^3 год /см^2).

Визначення цих же показників після виконання оздоблювальних операцій виявило відсутність повітропроникності того ж самого зразка.

Рекомендовано провести аналогічні дослідження для виробничих зразків, для яких покриття наносять розпилюванням. Рекомендовано також визначити паропроникність цих зразків.

Визначення товщини покриття на шкірі ваговим методом. В залежності від виду покриття, методу його нанесення, складу покривної фарби товщина покриття на шкірі може бути різною. Товщина оздоблювальної плівки суттєво впливає на зовнішній вигляд та еластичність шкіри, її гігієнічні властивості.

Для визначення товщини покриття із ділянки шкіри, призначеної для фізико-механічних випробувань, відбирають два зразки розміром 2 на 10 см. У разі визначення товщини емульсійного покриття, зразок шкіри спочатку змочують бутилацетатом з бахтарм'яного боку. Змочений зразок витримують 3–5 хв. Розчинене покриття зчищають скальпелем, не пошкоджуючи волокон шкіри, до повного «оголення» її лицьової поверхні в попередньо зважений бюкс. Бюкс висушують до постійної маси в сушильній шафі при температурі 65–70 ºС. Маса висушеної плівки (мг), що припадає на 1 дм^2 вказує на товщину покриття на шкірі.

Спостереження: за результатами дослідження товщина покриття складає 45 мг/дм^2. Дуже низький рівень даного показника пояснюється тим, що на поверхні шкіри майже відсутнє покриття, яке можна зчистити. Це підтверджує те, що навіть за умови нанесення покриття щітками в 6 проходів, досліджувана покривна композиція «провалюється» в структуру дерми.

Дослідження властивостей покриття на шкірі виконано за трьома показниками, а саме: визначення стійкості покриття до багаторазового вигину; визначення стійкості покриття до сухого та мокрого тертя; визначення адгезії покриття до сухої та мокрої шкіри.

Визначення стійкості покриття до багаторазового вигину. Стійкість покриття до багаторазового вигину визначають на приладі ІПК-2. Цей показник характеризується кількістю вигинів зразка шкіри до утворення дефектів на покритті.

Для випробувань із стандартної ділянки шкіри вирізують прямокутні зразки розміром 45×80 мм і витримують їх в ексикаторі над сірчаною кислотою (густина 1,30–1,32) протягом 24 годин. Потім зразок згибають в середині в довжину лицьовою поверхнею всередину, вставляють у верхній затискач приладу і затискають гвинтом. Далі вільну частину зразка вивертають лицьовою поверхнею назовні. Вільний кінець зразка закладають у нижній затискач і щільно затискають гвинтом.

Огляд покриття шкіри проводять після 100, 1000 і 10000 тисяч вигинів. Відзначають кількість циклів до появи таких дефектів, як зміна тону забарвлення, утворення тріщин, зміна кольору покриття на ділянці складки, втрата зв'язку між шарами покриття, осипання покриття.

Якщо шкіри хромового дублення для верху взуття із шкур великої рогатої худоби і козлини витримують не менше 50000 вигинів, їх стійкість вважається відмінною; якщо не менше 40000 – доброю, а не менше 30000 – задовільною.

Спостереження: дослідний лабораторний зразок витримав більше 30000 вигинів без втрати цілісності покриття, його розтріскування та осипання.

Рекомендовано провести аналогічні дослідження для виробничих зразків

Визначення стійкості покриття до сухого та мокрого тертя. Метод визначення стійкості покриття на шкірі до сухого та мокрого тертя полягає в стиранні лицьової поверхні зразка до появи дефектів покриття. Випробування проводять на приладі ІПК-1.

Стирання лицьової поверхні зразка проводиться під навантаженням від 0,7 до 2,5 кг. Зразки у формі кола діаметром 40 мм вирізують із стандартної ділянки шкіри. Випробування закінчують при перших ознаках порушення покриття на шкірі. Покриття вважається стійким до сухого тертя якщо зразок шкіри витримує 200 обертів без пошкодження покриття, до мокрого тертя – 100 обертів без пошкодження покриття.

Спостереження: дослідний лабораторний зразок витримав 500 обертів за сухого тертя без пошкоджень покриття; повсть, використана у машині для тертя, «навела» глянець на поверхні зразка. Стійкість зразка до мокрого тертя складає більше 200 обертів.

Рекомендовано провести аналогічні дослідження для виробничих зразків

Визначення адгезії покриття до сухої та мокрої шкіри. Адгезія покриття характеризується міцністю прилипання покриття до поверхні шкіри. Для випробувань з кожної шкіри беруть два зразки розміром

7 на 5 см. Далі, із попередньо випраної в гарячій воді, висушеної та випрасуваної щільної бавовняної тканини беруть по два зразки такого ж розміру (7х5 см). Кожну смугу тканини рівномірно намазують клеєм. З одного кінця смуги 1 см тканини залишають без клею. В якості клею найчастіше використовують «Десмакол». Після підсихання першого шару клею, наносять другий шар так, щоб клей не розтікався по поверхні тканини. Потім зразки тканини накладають на зразки шкіри і приклеюють таким чином щоб між тканиною і поверхнею шкіри не залишилось повітря. Склейки спочатку підсушують при кімнатній температурі, пресують при тиску 0,5 кг/см2 протягом 20 хвилин і сушать в сушильній шафі при температурі 50–60 ºС протягом 3–4 годин.

Після охолодження склейки перевіряють на придатність до випробувань. Придатними вважають ті склейки, в яких при пробі на відрив покривна плівка залишається на поверхні тканини, а відрив відбувається на межі прилягання покриття до поверхні шкіри.

Спостереження: дослідні зразки виявились не придатними для визначення адгезії через відсутність покривної плівки на поверхні шкіряного напівфабрикату.

Висновки

За результатами досліджень на визначення стійкості покриття до багаторазового вигину; визначення стійкості покриття до сухого та мокрого тертя; визначення адгезії покриття до сухої та мокрої шкіри; визначення

сухого залишку, визначення pH дисперсії полімерів, визначення загущення латексу при дії гідроксиду амонію, отримання вільної плівки, визначення загущення латексу при дії електролітів, визначення вмісту мінеральних речовин, визначення усмоктувальної здатності поверхні шкіри, визначення повітропроникності шкіряного напівфабрикату та шкіри з покриттям, визначення товщини покриття на шкірі ваговим методом можна зробити наступні висновки, а саме [6-10]:

- скоріше за все , досліджувану композицію можна віднести до класу поліуретанів – полімерів, що незмінно мають певне число уретанових груп –NH-CO-O-;
- поліуретанові плівки надають оздобленій шкірі стійкості до води, органічних розчинників і атмосферних впливів, високого блиску, а також полегшують чищення й догляд за взуттям;
- поліуретанове оздоблення стійке до стирання й механічних пошкоджень;

Відомо кілька способів одержання поліуретанів. Найбільш широке поширення одержав синтез поліуретанів на базі двох- або більше функціональних ізоціанатів, які по реакції східчастої полімеризації досить активно взаємодіють із гідроксильними, аміно-, кислотними й іншими групами, що містять активний водень, а також з водою.

Рекомендації: провести спектроскопічні дослідження власне покривної композиції, а також плівки, яку вона утворює у воді. Швидка полімеризація може бути пов'язана з блокування активних груп.

Література

1. Данилкович А. Г. Біотехнологічні процеси в технології формування шкіряних матеріалів / А. Г. Данилкович, В. І. Ліщук, О. А. Охмат // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2018. – Т. 24, № 5. – С. 14-24. (фіксований власний внесок -3,7 сторінки)

2. Данилкович А.Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра /А.Г. Данилкович //- К.: Фенікс, 2006.

3. Рибальченко В.В., Коновал В.П., Дрегуляс Е.П. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Методи випробувань: Навчальний посібник. – К. : КНУТД, -2010. -395с.

4. Kozar O. P. Deformation characteristics of leather for shoe upper, filled with natural minerals / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, B. Wozniak // Journal of Chemistry and Chemical Engineering (USA). – 2014. – № 8. – P. 47-53. –ISSN 1934-7375.

5. Козарь, О. П. Оцінка релаксаційно-деформаційних характеристик шкір для верху взуття, наповнених природними мінералами / О.П. Козарь, О. Р. Мокроусова, В. П. Коновал // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 4. – С. 107-115.

6. ДСТУ ISO 5404:2007 Шкіра. Фізико-механічні випробування.

7. ГОСТ 938.11 Кожа. Метод испытания на растяжение.

8. ГОСТ 13868 Кожа хромовая для верха обуви. Метод определения устойчивости покрытия к многократному изгибу.

9. ГОСТ 939 Кожа для верха обуви. Технические условия.

10. ГОСТ 938.29 Кожа. Метод испитания устойчивости окраски к сухому и мокрому трению.

References

1. Danilkovich AG Biotechnological processes in the technology of formation of leather materials / AG Danilkovich, VI Lischuk, OA Okhmat // Scientific works of the National University of Food Technologies. - 2018. - T. 24, No. 5. - P. 14-24. (fixed own contribution -3.7 pages)

2. Danilkovich AG Workshop on Chemistry and Technology of Leather and Fur / A.Г. Danilkovich // - K .: Phoenix, 2006.

3. 3.V.Ribalchenko, V.P. Konoval, and E.P. Material science of light industry products. Test Methods: Tutorial. - K.: KNUTD, 2010. -395s.

4. Kozar, O. P. Deformation characteristics of leather for shoe upper, filled with natural minerals / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, B. Wozniak // Journal of Chemistry and Chemical Engineering (USA). - 2014. □ No. 8. □ R. 47-53. –ISSN 1934-7375.

5. Kozar, OP Estimation of relaxation and deformation characteristics of leather for the top of shoes, filled with natural minerals / OP. Kozar, OR Mokrousova, VP Konoval // Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design. - 2013. - № 4. - P. 107-115.

6. DSTU ISO 5404: 2007 Leather. Physico-mechanical tests.

7. GOST 938.11 Leather. Tensile test method.

8. GOST 13868 Leather chrome for the top of the shoe. The method of determining the resistance of the coating to multiple bending.

9. GOST 939 Leather for shoe uppers. Specifications.

10. GOST 938.29 Leather. Method of testing the resistance of paint to dry and wet friction.

Надійшла / Paper received : 22.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-250-253
УДК 677.017.8

В.М. ДУРАЧ
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів
Л.Г. НІКОЛАЙЧУК
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ТА ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗНАРКОТИЧНИХ КОНОПЕЛЬ ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В УКРАЇНІ

Значне збільшення обсягів виробництва та розширення асортименту різноманітних видів товарів з конопель в Україні, обґрунтувало значимість здійснення поглиблених досліджень асортименту та властивостей коноплевмісних текстильних матеріалів і виробів різноманітного призначення, оцінки рівня їх якості та конкурентоспроможності. Тому в статті обґрунтовано доцільність збільшення обсягів вирощування технічних конопель для виробництва з них різноманітних товарів в Україні.

Ключові слова: текстиль з технічних конопель, властивості волокон, сучасний асортимент, спеціальні тканини, сучасні технології.

V.M. DURACH
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv
L.G. NIKOLAICHUK
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy,Lviv

PROBLEMS AND PROSPECTS OF MANUFACTURING AND APPLICATION OF NON-NARCOTIC HEMP FOR SPECIAL PURPOSE IN UKRAINE

Abstract – *Hemp fiber is one of the most versatile natural fibers used in the textile industry for thousands of years. Therefore, the demand for products from it is constantly growing. Growing hemp is much safer for the environment than growing cotton. In addition, hemp fiber neutralizes toxins, prevents the development of pathogenic bacteria, does not create conditions that interfere with metabolic processes in the skin. Despite intensive selection work to reduce the content of tetrahydrocannabinol, Ukrainian scientists have managed to preserve the main value of the culture - the ability to form a high yield of stems and fibers.*

Modern technologies allow the use of hemp fiber for the production of various types of fabrics, namely for technical fabrics or geotextiles, for household fabrics or knitwear. Hemp textiles have high strength, water resistance and wear resistance, antibacterial and antiseptic properties. The fabric is shape- and color-resistant, so such clothes retain the same shape and color as the original product, even after several dozen wash cycles. Hemp fabric has high strength and practicality, does not cause allergies, creates temperature and energy balance, has antiseptic and wound-healing functions, because the fiber retains 20% of oil, which is extremely healing. A special difference between hemp fiber and synthetic fiber is its antistatic and tissue hygiene.

A significant increase in production and expansion of the range of various types of hemp products in Ukraine, justified the importance of in-depth studies of the range and properties of hemp-containing textile materials and products for various purposes, assessing their quality and competitiveness. Therefore, the article substantiates the expediency of increasing the volume of cultivation of technical hemp for the production of various goods from them in Ukraine. In Ukraine, practical experience has identified the need for the development of the following major industries: breeding and agricultural technologies of modern hemp; clothing and footwear (fabrics, knitwear and footwear made of hemp fiber); cellulose and others. Regarding the textile direction, one of the most promising is the creation of a new range of materials and special purpose products.

Key words: textile made of industrial hemp, properties of fiber, modern assortment, special fabrics, modern technologies.

Постановка проблеми

Уже кілька останніх десятиліть коноплі асоціюються з чимсь негативним, поганим, шкідливим. Зрозуміло чому: бо ця рослина є сировиною не лише для виготовлення низки корисних речей, а й сильнодіючих наркотиків. Через це людство опинилося перед необхідністю заборони вирощування культури. Але українські вчені врятували її репутацію.

У 20-30-х роках ХХ ст. наркотики із коноплі (гашиш, марихуана) були дуже популярні, тож стали нелегально вироблятися у всьому світі. У 1940-х споживання марихуани в США набуло характеру епідемії.

Коли людство усвідомило масштаби і наслідки наркоманії, зокрема конопляної, стало боротися з цим злом і законодавчо, і методом селекції. Вчені почали працювати над створенням нейтральних відносно наркотичної дії сортів конопель. В СРСР ця робота розпочалась 1972 року і контролювалась трьома міністерствами (сільського господарства, внутрішніх справ і охорони здоров'я). Проте якихось помітних успіхів так і не було досягнуто [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технічні коноплі - традиційна українська рослинна сировина, яку наші предки вирощували багато століть. Вони вживали її в їжу, шили з неї одяг, виготовляли ліки і декоративні вироби. Але з часом українських виробників виштовхнули з ринку під приводом боротьби з наркотиками. У той же час, в світі попит на продукцію з технічних конопель постійно зростає: за останні 10 років світовий ринок ненаркотичних конопель піднявся «з нуля» до кількох сотень мільярдів доларів. На сьогодні з конопель виготовляють 50 тис. видів різноманітної продукції [2].

Вчені почали працювати над створенням нейтральних відносно наркотичної дії сортів конопель. В СРСР ця робота розпочалась 1972 року. Проте якихось помітних успіхів так і не було досягнуто. В часи незалежності України ця важлива справа була доручена Інституту луб'яних культур, а з 2013 року — Дослідній станції луб'яних культур (ДСЛК) Інституту сільського господарства Північного сходу НААНУ,

що в м. Глухові на Сумщині. Аналіз сортів світової колекції конопель, що є у відділі технічних культур Інституту рослинництва ім. М. І. Вавилова (Санкт-Петербург, РФ), показав, що в природі немає сортів без специфічних фенольних сполук-канабіноїдів, які справляють наркотичний ефект. Тому селекціонери у всьому світі передусім були зорієнтовані на отримання високих урожаїв волокна й насіння.

Проте, як кажуть, вода і камінь точить. Завдяки наполегливим зусиллям українських селекціонерів вдалося поступово знизити поріг умісту ТГК (тетрагідроканабінол — найтоксичніша складова гашишу, психотропна речовина, що викликає галюциногенні відчуття) з 0,3 % (1972 р.) до 0,08 % (2012 р.) і при цьому зберегти урожайність культури. Врешті-решт, залучивши новий селекційний матеріал, а також застосувавши нові удосконалені методи визначення вмісту канабіноїдів, удалося отримати якісно нову селекційну сировину не тільки без ТГК, а й без інших компонентів канабіноїдів. На прикладі першого сорту конопель ЮСО-45 було продемонстровано переконливу можливість виключення посівних конопель зі списку наркотичних культур. Це була велика перемога української науки міжнародного значення [3].

В Україні галузь коноплярства почала відроджуватися в 2012 році. Першопрохідникам доводилося діяти в рамках правової бази, норми якої розраховані на психотропну коноплю або марихуану. Наприклад, аграрії повинні були платити за охорону посівів. На сьогоднішній день ця вимога скасували, але залишилося безліч інших норм, які гальмують розвиток галузі. Наприклад, обов'язкова наявність ліцензії на посів і вирощування.

На сьогоднішній день цю вимогу скасували, але залишилося безліч інших норм, які гальмують розвиток цієї галузі. За оцінками спеціалістів і науковців, переломне значення для відродження вітчизняної коноплярської галузі мало ухвалення (з ініціативи ДСЛК та асоціації «Українські технічні коноплі») в серпні 2012 року постанови Кабміну про спрощення умов культивування технічних конопель із низьким вмістом наркотичних речовин, яка скасувала норму про обов’язкову охорону таких посівів.

Метою роботи є: На основі аналізу літературних даних сформулювати проблеми та перспективи вимоги виробництва текстильних матеріалів із технічних конопель і обґрунтувати сфери їх найбільш раціонального використання.

Виклад основного матеріалу

Приборкання наркотичного дракона у коноплі стало можливим завдяки напруженій творчій праці всього колективу Інституту луб’яних культур. Президія НААН України за наукову роботу «Створення і впровадження високопродуктивних сортів однодомних конопель з відсутністю наркотичних властивостей» у 2006 році присудила авторам сорту премію за видатні заслуги в аграрній науці.

Нині селекціонерів В. Вировця, І. Лайко, Л. Горшкову, М. Мигаля, Г. Кириченко, І. Щербаня та М. Орлова висунуто на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки.

Підсумовуючи багаторічні результати наукової роботи глухівських селекціонерів, без перебільшення можна сказати, що вони внесли суттєвий вклад у справу боротьби з розповсюдженням наркотичних засобів у світі та врятували коноплярство як сільськогосподарську галузь не тільки в Україні, а й в усьому світі.

Аналогів такої селекційної школи у світі нема. Тільки в Україні накопичено усесторонній досвід з комплексу питань, пов’язаних зі створенням ненаркотичних сортів коноплі з насіннєвою продуктивністю до 2 т/га й більше, із умістом волокна на рівні 38,9% та врожайністю стебла від 10 до 20 т/га. В ряді країн займаються лише підтримуючою селекцією сортів коноплі. Скажімо, у Франції теж виведено подібні сорти, але якщо вміст ТГК в межах ЄС допускається до 0,2%, то в Україні — 0,08%! В Канаді всі сорти створені на основі українських. У Росії жоден із сортів не відповідає міжнародним нормам, та й за урожайністю вони «не дотягують» до наших.

Виробники зацікавлені не тільки у вирощуванні конопель на насіння, а й у більш глибокій переробці цієї продукції. Саме попит в Європі і Америці і підштовхнув українських виробників освоювати і розвивати цей сегмент ринку.

Але, як виявилося на практиці, не все так просто. Не маючи підтримки держави, учасники цього ринку стверджують, що їм доводиться боротися з безглуздими нормативами і вимогами, вирішувати проблеми відсутності переробних заводів, самим шукати ринки збуту і формувати культуру споживання [1].

Не поспішають чиновники підтримати перспективну галузь і щодо використання даної рослини. У всьому світі 100% рослини конопель переробляється. А листя і суцвіття - найдорожча сировина з 50-70% рентабельності, дуже затребуване в фармакології, косметології та продуктах харчування. Але через відсутність законодавчих норм, український виробник конопель може працювати тільки з насінням і трестою. Тобто, 15% рослини ми викидаємо, що становить в окремих випадках до 70% її рентабельності [3].

Але, як виявилося на практиці, не все так просто. Не маючи підтримки держави, учасники цього ринку стверджують, що їм доводиться боротися з безглуздими нормативами і вимогами, вирішувати проблеми відсутності переробних заводів, самим шукати ринки збуту і формувати культуру споживання [1, 4].

За словами учасників ринку, 90-95% споживачів не знає про існування коноплі, яка не містить наркотичні речовини. Тому і реакція на вироби з цієї культури - відповідна.

З проблемою необізнаності зіткнулися багато країн і вирішили її на рівні держави. Наприклад, в Чехії протягом 10 років проводили спеціальні заходи для формування ставлення споживачів до технічної коноплі. У Канаді існує державна програма, яка пояснює, що технічні коноплі - це не наркотик, а надзвичайно рентабельна культура [1]. В Україні «вихованням» споживача займаються тільки самі учасники ринку - в міру своїх можливостей.

І далі потрібно зменшувати дисбаланс, який існує сьогодні на ринку України між економічною ефективністю вирощування технічних конопель - з одного боку, і з площами посівів, кількістю заводів по їх переробці - з іншого боку. Для цього мало зусиль підприємців. Потрібно вдосконалити нормативно-правову базу, не розтягуючи це на роки. Держава повинна залучати інвестиції - в селекцію і виробництво,

заохочувати виробників, надаючи їм дотації з державного і місцевих бюджетів, популяризувати продукцію.

Розвиток сегменту ринку промислових конопель дасть поштовх розвитку і інших галузей. [1]. Сподіваємося внести зміни в нормативно-правові акти, згідно з якими в Україні можна буде застосовувати легально листя, суцвіття й екстракт конопель у промислових цілях, наприклад, косметологічних або продуктових. Це дозволить виводити на ринок велику кількість продуктів, багатих канабіноїдами.

Канабіноїди допомагають при лікуванні онкозахворювань, різного роду нейродегенеративних та дуже важких хронічних патологічних хвороб, синдрому Драве та хвороби Альцгеймера. Ці патології поширені в нашій країні, але лікувати їх неможливо. Фактично, ми стоїмо на порозі буму, який у 2016 році відбувся у Швейцарії, коли галузь коноплярства з обігу в 200-300 тис. євро зросла до 100 млн євро в 2017 році. Цей «вибух» пов'язаний з використанням безнаркотичних канабіноїдів у промислових цілях.

В Україні волокна в значній кількості постачаються до Європи як сировина для біокомпозитних матеріалів. Також багато довгого волокна купує Китай. І невелика кількість цієї продукції йде на внутрішній ринок для виготовлення текстильних виробів.

Заважає нашим аграріям збільшувати площі під коноплями не в 2 рази кожного року, а ще більше: по-перше, доволі заплутана нормативно-правова база, значна кількість дозвільної документації, яку потрібно отримувати. Асоціація тим і займається, що зменшує кількість цієї документації. І другий момент, є дуже гарна приказка для коноплярства: «коноплі люблять довгий рубль», тобто значні фінансові вкладення. Для того, щоб зараз на ринку існувати та працювати, потрібно вкладати в переробку, обладнання, знання агрономів, техніків, селекціонерів, насіннєвиків і т.д. Це цілий комплекс питань, а для цього потрібні гроші. Вкладаючи в технології, обладнання, переробку, ми отримуємо достойний результат. [5].

Відомо, що законодавча база різних країн світу спрямована на підтримку виробника конопель без додаткових охоронних заходів, які вимагають значних фінансових витрат. У 2012 р. Постановою КМУ від 22 серпня 2012 р. №800 визначено поняття «технічні коноплі», а з серпня цього року, за умови дотримання ліцензійних умов вирощування конопель, посіви не підлягають обов'язковій охороні.

Вимоги до вмісту ТГК (тетрагідроканабінолу) в коноплях в нашій країні одні з найбільш жорстких (до 0,08%). Суттєво впливають на економічну привабливість вирощування конопель заходи щодо організації супутніх виробництв із переробки коноплепродукції. Для успішного та ефективного розвитку галузі коноплярства Україна повинна врахувати досвід закордонного законодавства та адаптувати власне в сучасні українські реалії. Нині триває вивчення попереднього проекту змін у діюче законодавство України, зокрема зміни пов'язані із додатковим спрощенням оформлення ліцензійних дозволів та умов вирощування посівів конопель.

Промислові коноплі - однорічна лубоволокниста рослина родини Cannabis із вмістом ТГК не більше 0,08%, яку вирощують для одержання волокна і насіння. З усіх частин рослини найбільш цінною є стебло, яке складає 60-70% від загальної сухої маси. Стебло - джерело одержання волокна. Його довжина варіює від 0,8 до 4,0 м, залежно від сортів і умов вирощування. Діаметр стебел конопель мінливий і змінюється в межах 2-25 міліметрів. Із рослини конопель одержують насіння, волокно та деревину.

Із волокна конопель виробляють побутові та технічні тканини, неткані матеріали та різні кручені вироби, які широко застосовуються в різних галузях виробництва. Із насіння конопель виробляють олію, що використовується в харчовій, хімічній і фармацевтичній промисловості. Деревина конопель широко застосовується при виготовленні меблів, у будівництві та для виробництва костробетону, а також для опалення побутових і виробничих приміщень.

Цікавість підприємців до розвитку галузі як в Україні, так і за кордоном стрімко зростає. Необмеженим попитом користується насіння посівних конопель, продукти харчування, волокно, паливні брикети. В Європі поширюється будівництво екологічно чистих будинків із конопель, виробництво тканин, пелетів. Останні використовуються як енергетичний засіб і є актуальними для України, Польщі, Прибалтики.

В результаті кропіткої роботи науковці Дослідної станції луб'яних культур створили сорти конопель з повною відсутністю наркотичних властивостей. Вони занесені до Реєстру сортів рослин України, Росії, країн ЄС і Канади. Ці коноплі не можуть бути використані як сировина для виготовлення наркотичних препаратів, вирощування їх не становить жодної соціальної небезпеки. Хіба що умовно, бо вони зберегли назву «коноплі», тож їх відносять до категорії рослин, що містять наркотичні засоби. Останні розробки селекціонерів дослідної станції - це сорти ненаркотичних конопель Вікторія, Гляна та Ніка.

Текстильний напрямок – традиційний у використанні коноплесировини для нашої країни. Це і текстильні вироби, і одяг, і взуття тощо [3].

Наприклад, в Китаї найбільшим покупцем сучасної конопляної продукції є китайська армія, що замовляє уніформу і шкарпетки з конопель для своїх солдатів. В Україні перспективною інновацією могла би стати військова форма з чистоконопляних або бавовноконопляних тканин [6].

17 квітня 2018 року в рамках загальноосвітнього проекту «Конопляний університет» на базі агробіологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування (НУБіП), Асоціацією «Українська технічна конопля» проведено Міжнародний круглий стіл «Конопляне волокно і вироблена з нього продукція». Результатом роботи круглого столу стала прийнята колективна резолюція-звернення до державних органів:

1. У зв'язку з неодноразовими зверненнями членів Асоціації «Український технічні коноплі» про необхідність перегляду обов'язковості надання у відповідні державні структури неодноразової звітності - звернутися до Держлікслужби України з вимогою в ході проведення чергового засідання робочої групи, створеної з метою внесення змін до чинних нормативно-правові акти, переглянути положення окремих пунктів ПКМУ 589-3.06.2009 і 282-6.04.2016 р

2. З огляду на недосконаліть чинної нормативно-правової бази по оформленням необхідних

дозвільних документів, спрямованих на отримання ліцензії, на культивування, зберігання, перевезення, реалізацію (відпуск), знищення, використання технічних конопель, звернутися до відповідних державних інституцій з пропозицією скасування дозволу національної поліції на використання об'єктів і приміщень, призначених для здійснення діяльності з обігу наркотичних засобів, психотропних речовин і прекурсорів.

3. У зв'язку з такими, що стримують подальший розвиток галузі промислового коноплярства, звернутися до відповідних державних установ з вимогою внесення змін в окремі пункти ПКМУ 589 від 3.06.2009 стосуються переробки стебел конопель та знищення залишків, одержуваних в ході переробки.

4. З огляду на, що обладнання, яке використовуються для переробки стебел конопель на території України не виробляються, а галузь не здатна розвиватися без використання сировини всієї рослини (в першу чергу стебла) звернутися до відповідних державних установ з пропозицією розглянути питання про підтримку вітчизняного виробника устаткування переробної промисловості створеного науковим потенціалом України і надання пільг на ввезення обладнання закордонного виробництва, зокрема, скасування ввізного мита на машини і механізми, які використовуються в провідних країнах світу на потужностях з переробки технічних конопель.

Висновок

Слід вважати конопляне волокно як цінну вітчизняну сировину для текстильної, целюлозної, фармакологічної, косметичної, будівельної та інших видів промисловості, яку треба досліджувати.

Але одним з найбільш перспективних слід виділити саме текстильний напрям виробництва продукції з конопель – традиційний у використанні коноплесировини для нашої країни. Це і текстильні вироби, і одяг, взуття тощо. Особливо важливою групою тут є текстиль спеціального призначення (для спеціальних виробництв, пожежників, нафтовиків та ін.), де дуже актуальними в умовах сьогоднішньої війни з Росією є розробки для військової форми збройних сил України та військових формувань.

Література

1. Степанушко Л. Made in Ukraine: З головою у коноплі / Л. Степанушко// AgroPortal.ua, -28 лютого, 2016. - Режим доступу: http://agroportal.ua/special-projects/made-in-ukraine-s-golovoi-v-konoplyu/

2. Ніколайчук Л.Г. Сучасний асортимент товарів із технічних конопель / Л.Г. Ніколайчук // Вісник Хмельницького національного університету. - Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2018. - № 3. – 288 с. - С. 130-134.

3. Матеріали асоціації «Технічні коноплі». - Режим доступу: http:tku.org.ua.

4. Поліщук С.О. Сучасний стан і перспективи текстильної галузі України /С.О. Поліщук, О.П. Сумська //Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний стан легкої і текстильної промисловості: інновації, ефективність, екологічність» (12-17 вересня 2017 р.): Херсон: Видавництво ХНТУ, 2017. – С. 19-20 – 162 с.

5. Примаков О. Ненаркотичні коноплі: перспективи застосування / О. Примаков // Аграрний тиждень. Україна. – 18 листопада, 2013. – Режим доступу: https://journals.ua/prof/agrarnyi-tyzhden-ukraina.

6. Карпюк О.М. Нові можливості використання конопель для камуфляжу військовослужбовців та іншого спецтекстилю / О.М. Карпюк, Д.І. Сапожник, Л.Г. Ніколайчук // «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації» (СТПК-2018): Матеріали міжнародної наук.-практ. конф., 12-16 вересня 2018 року, м. Херсон (Україна), Херсонський національний технічний університет, 2018. – С. 218-220. – 258 с.

7. Дурач В.М. Правові проблеми виробництва та використання технічних конопель для текстильних матеріалів спеціального призначення в Україні / В.М. Дурач, Л.Г. Ніколайчук // «iScience», «Актуальные научные исследоваия в современном мире» // Журнал - Переяслав, 2020. – Вип. 2 (58), ч. 1. – С. 149-154. – 170 с.

References

1. Stepanushko L. Made in Ukraine: Z holovoiu u konopli / L. Stepanushko// AgroPortal.ua, -28 liutoho, 2016. - Rezhym dostupu: http://agroportal.ua/special-projects/made-in-ukraine-s-golovoi-v-konoplyu/

2. Nikolaichuk L.H. Suchasnyi asorty`ment tovariv iz texnichny`x konopel` / L.G. Nikolajchuk // Visny`k Xmel`ny`cz`kogo nacional`nogo universy`tetu. - Texnichni nauky`. – Xmel`ny`cz`ky`j: XNU, 2018. - # 3. – 288 s. - S. 130-134.

3. Materialy asotsiatsii «Tekhnichni konopli». - Rezhym dostupu: http:tku.org.ua.

4. Polishchuk S.O. Suchasnyi stan i perspektyvy tekstylnoi haluzi Ukrainy /S.O. Polishchuk, O.P. Sumska //Tezy dopovidei III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasnyi stan lehkoi i tekstylnoi promyslovosti: innovatsii, efektyvnist, ekolohichnist» (12-17 veresnia 2017 r.): Kherson: Vydavnytstvo KhNTU, 2017. – S. 19-20 – 162 s.

5. Prymakov O. Nenarkotychni konopli: perspektyvy zastosuvannia / O. Prymakov // Ahrarnyi tyzhden. Ukraina. – 18 lystopada, 2013. – Rezhym dostupu: https://journals.ua/prof/agrarnyi-tyzhden-ukraina.

6. Karpiuk O.M. Novi mozhlyvosti vykorystannia konopel dlia kamufliazhu viiskovosluzhbovtsiv ta inshoho spetstekstyliu / O.M. Karpiuk, D.I. Sapozhnyk, L.H. Nikolaichuk // «Suchasni tekhnolohii promyslovoho kompleksu: bazovi protsesni innovatsii» (STPK-2018): Materialy mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf., 12-16 veresnia 2018 roku, m. Kherson (Ukraina), Khersonskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet, 2018. – S. 218-220. – 258 s.

7. Durach V.M. Pravovi problemy` vy`robny`cztva ta vy`kory`stannya texnichny`x konopel` dlya teksty`l`ny`x materialiv special`nogo pry`znachennya v Ukrayini / V.M. Durach, L.H. Nikolaichuk // «iScience», «Aktualnыe nauchnыe yssledovayia v sovremennom myre» // Zhurnal - Pereiaslav, 2019 Vup/ 2 (58), P. 1 – S. 149-154. – 170 s.

Надійшла / Paper received : 19.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-254-257
УДК 677.11.021

Г.А. БОЙКО, А.С. ТІХОСОВ
Херсонський національний технічний університет

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЛУБ'ЯНОЇ СИРОВИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В статті проведене обґрунтування та експериментальне підтвердження застосування розробленого комплексного інформаційного метода контролю та підтримки нормованих показників вологості та температури на базі датчиків GY-21 HTU21 та мікрокомп'ютера Raspberry Pl B+. Дана методика була розроблена з метою контролю та збереження якісних показників температури і вологості в процесі розстилу, зберігання та підготовки до технологічної переробки луб'яної соломи та трести. Розроблена інформаційна методика полегшує обробку числових даних, одержаних під час технологічних процесів, економить час та кошти на проведення досліджень та забезпечує нормативні якісні показники луб'яної сировини до подальшої її переробки.

Ключові слова: технічні коноплі, льон олійний, вологість, температура, IT-технології, датчики вологості.

G.A. BOYKO, A.S. TIKHOSOV
Kherson National Technical University

QUALITY CONTROL OF BAST RAW MATERIALS USING INFORMATION TECHNOLOGIES

The main purpose of this work is to develop a modern method for determining and controlling the quality of temperature and humidity in the preparatory stages for the processing of bast raw materials. Recent studies of domestic and world markets and surveys of light industry show that at present and in the near future the leading position remains in natural commodities. This is due to the fact that modern society prefers environmentally friendly products from natural raw materials, rather than synthetic and artificial. In the world production of environmentally friendly products, bast raw material occupies a leading position as a source of natural raw materials, as it is reproduced by its hygienic, medical, biological and protective power structures, the preservation of which is invited to participate in all stages of processing. To achieve this goal, the articles prepare and experimentally confirm the application of the developed comprehensive information control method and support the normalized quality and temperature indicators based on GY-21 HTU21 sensors and Raspberry Pl B + microcomputer. This technique controls and maintains quality indicators of temperature and humidity in the process of drying, storage and preparation for technological processing of bast straw and trusts. This program helps the user to see all the collected data in the form of graphs on the page of his company. When opening the page for the first time, the user can see a map of the area where the straw is spread in the field, and the latest humidity and temperature on all sensors. The user can also choose the type of storage or drying, depending on what messages will be generated about the achievement of the desired humidity, or deviation from the temperature and humidity by more than 10%. When the optimum drying temperature of bast stalks and humidity of 19% is reached, the user is notified that the drying process has stopped, and what optimal parameters for collecting distribution have been achieved, and with what indicators raw materials can be stored or prepared for further processing. This technique can be used in the storage and preparation of raw materials for processing in order to preserve all the quality properties of the future bast fiber and its products. This program is created in English and Ukrainian versions, based on both domestic and foreign consumers (representatives of the industrial complex for processing bast straw or trusts). The developed information methodology facilitates the processing of numerical data supported during technological processes, saving time and money during research and the availability of regulatory quality indicators of bast raw materials for subsequent translations.

Keywords: technical hemp, oil flax, humidity, temperature, IT technologies, humidity sensors.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Протягом останнього часу легка промисловість зіштовхнулась з рядом проблем, які призвели до погіршення показників її діяльності, зокрема через фінансову кризу, застарілі технології, устаткування та технічну документацію, а головне відсутність власних сировинних ресурсів. Робота вітчизняних виробництв легкої промисловості нашої держави на 80% залежить від імпортованих ресурсів. Але, в той час перед Україною виникли нові можливості – власна сировинна база (волокна льону олійного та технічних конопель), скориставшись, якими можна досягти нового етапу становлення легкої промисловості [1]. Адже, дана лубоволокниста сировина має високі санітарно-гігієнічні властивості, які забезпечують регулярний теплообмін і позитивно діють на хребет і опорно-руховий апарат людського організму. Тканини з лубоволокнистих матеріалів мають високу повітропроникність, що сприяє утриманню кисню в структурі текстильних виробів, який виключає розвиток анаеробних бактерій і можливість їх розмноження всередині різноманітних видів одягу, трикотажу, взуття тощо [2]. Застосування таких матеріалів у виробництві товарів легкої промисловості не тільки забезпечить вітчизняний ринок якісними виробами, але й дасть підтримку вітчизняній сировині.

Забезпечити високу якість лубоволокнистих матеріалів можливо лише контролюючи показники якості сировини на всіх етапах технологічного процесу з використанням сучасних інформаційних технологій. Адже, вихід конкурентоспроможних виробів напряму залежить від якості сировини з якої вони виготовлялися. В сучасних реаліях контроль не тільки готового виробництва але й контроль технологічних процесів та підготовки сировини до перероблення повинні бути системно автоматизовані для більш точних експериментальних даних та збереженні часу на випробуваннях.

Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано вирішення проблеми. На даний час отримання якісного луб'яного волокна зі стебел технічних конопель та льону олійного на декортикаційних машинах є актуальним завданням для фахівців коноплепереробної та лляної галузі багатьох країн Європи [3]. Проблемі дослідження впливу фізико-механічних характеристик стебел конопель та льону на режими

роботи декортикаторів та всього технологічного процесу присвятили свої наукові праці багато закордонних і вітчизняних вчених: Гілязетдінов Р.Н., Супрун Н.В., Новіков Є.В., Hobson R.N., Lu Y., Merdan N., Pavlo Katin, Munder F. У цих роботах визначено основні характеристики луб'яної соломи, які мають істотний вплив на якісь вихідної сировини: довжину, діаметр, вологість, колір.

Одним з основних чинників впливу на якість волокна вважається вологість та температура вхідної сировини. На даний час існуючі методи визначення вологості луб'яної соломи, трести, довгого і короткого волокна, які занесені у діючі нормативні документи різних видів сировини є недосконалими. Одні з цих методів трудомісткі та вимагають багато часу, інші експрес-методи не дають точних результатів вимірювання. Таким чином, перед вітчизняними вченими постала задача визначення вологості луб'яної сировини методами, які зменшать час випробування та нададуть більш точні результати вимірювання протягом усього технологічного процесу переробки. Аналіз роботи закордонних вчених [4, 5] не допоміг вирішити це питання, адже роботи з визначення вологості сучасними методами проводилися в більшості випадків з бавовняною сировиною та матеріалами. Таким чином, на даний час проблематика оцінки якості сировини залишається відкритою. Висока якість та конкурентоспроможність матеріалів вітчизняного виробництва це актуальне завдання цього часу, яке постійно вирішується вітчизняними та закордонними науковцями.

Отже, за результатами аналізу напрацювань вітчизняних та закордонних вчених можна стверджувати, що запропонований метод комплексних досліджень якості луб'яної сировини не матиме аналогів в Україні та буде запорукою подальшого практичного розвитку легкої промисловості.

Формулювання цілей статті. Основними цілями даної роботи є:

- теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити оптимальний вибір комплексу технічних засобів автоматичного контролю якості луб'яної сировини;

- розробка мережі встановлення датчиків контролю вологості і температури на підготовчих процесах до основної переробки стебел луб'яних культур.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Вологість та температура стебел луб'яних культур є важливими технологічними характеристиками, оскільки від вмісту вологи у стеблах залежить їх зберігання, біологічний процес розстилання на полі під час перетворення стебел соломи в тресту й механічний процес виділення волокна від деревної частини стебел. Так, основні характеристики якості луб'яних волокон після механічного оброблення стебел – вміст костриці у волокні і його міцність напряму залежить від первинної вологості стебел, які подаються на переробку. Тому, важливим є встановлення оптимальних значень вологості стебел луб'яних культур для одержання високої якості волокна з найменшим вмістом костри та високою міцністю після механічного оброблення стебел в декортикаторах в процесі м'яття та тіпання на тіпальних машинах.

На основі вищевикладеного для виконання поставленого завдання було запропоновано наступні робочі гіпотези:

- використання на переробних підприємствах власних сировинних ресурсів за рахунок стебел льону олійного та технічної коноплі;

- розроблена сучасна система контролю якості обробки луб'яної сировини, може бути застосована для автоматичного контролювання вологості та температури на базі датчиків GY-21 HTU21 та мікрокомп'ютера Raspberry Pl B+;

- контроль температури та вологості дозволить підвищити якість оброблення лубоволокнистої сировини: зменшити вміст сторонніх домішок, збільшити вихід волокна, зберегти екологічні властивості одержаних виробів;

- сучасна система контролю якості луб'яної сировини, на відміну від існуючих стандартизованих методів збільшить точність показників та збереже час на їх визначення;

- отримані матеріали матимуть високі показники вологопоглинання, повітропроникності, санітарно-гігієнічні властивості, які дозволять виготовляти вироби легкої промисловості належної якості.

Таким чином для доведення поставлених гіпотез на першому етапі досліджень було досліджено існуючі методи контролю вологості лубоволокнистої сировини. У попередніх наукових працях вітчизняних науковців встановлені стандартизовані параметри вологості, за якими повинні оброблятися стебла луб'яних культур льону довгунця, льону олійного, технічних конопель при застосуванні технологій заготівлі, зберігання, біологічного процесу одержання трести та механічного оброблення стебел при одержанні волокна. Але, унормовані значення вологості соломи, трести та волокна луб'яних культур, які наведені у відповідних стандартах ДСТУ 4149:2003, ДСТУ 8422:2015 та ТУУ 01.1-05480298-002.2018 не відповідають оптимальним значенням вологості в залежності від типу та сорту луб'яних культур та потребують системного контролювання вологості на кожному етапі технологічного процесу з переробки луб'яних стебел [6].

Після проведених теоретичних досліджень методів системного контролю вологості було зроблено висновок, що в сучасному середовищі інформаційних технологій найдоцільнішим методом збору даних вологості та температури стебел луб'яних культур в процесі розстилу, зберігання, підготовки до перероблення буде побудова сенсорної мережі на основі датчиків та мікрокомп'ютера [7].

Таким чином, для подальших досліджень було обрано мережу ZigBee, адже на її основі можливо побудувати сенсорну мережу, яка дозволить збирати данні на відстані. Відстань від крайнього сенсора до

мікрокомп'ютера в даному дослідженні не буде впливати на якість показників, адже маркери передають дані один одному в межах мережі ZigBee.

На другому етапі було проведене обґрунтування та експериментальне підтвердження застосування розробленого комплексного інформаційного метода контролю та підтримки нормованих показників вологості та температури лубоволокнистої сировини на базі датчиків GY-21 HTU21 та мікрокомп'ютера Raspberry Pl B+. Данна методика дозволяє миттєво визначати вологість та температуру лубоволокнистої сировини в будь-який момент часу з точними даними вимірювань, а головне є легким у застосуванні за помірною ціною. Завдяки даній методиці з використанням сенсорної мережі отримання показників вологості та температури розстилу луб'яних культур можливе без додаткових затрат та зусиль, інформація надходить з різних точок поля на комп'ютер у вигляді графіків та зберігається на сервері.

На основі мікрокомп'ютера Raspberry Pl B+, приймачів і передавачів ZigBee мережі cc2530 та cc2531 та датчиків вологості GY-21 HTU21 було побудовано сенсорну мережу для моніторингу показників вологості та температури лубоволокнистої сировини під час її висушування в період розстилу на полі. За технологією природного мочіння, лубоволокниста сировина вилежується на полі під відкритим небом. За даною методикою формуються ряди з лубоволокнистих стебел шириною 25-40 см та відстанню між рядами 5 м. Таким чином, для отримання показників вологості з усіх точок вилежування, датчики для відстеження температури та вологості в період мочіння встановлювалися на відстані 5-15 м один від одного.

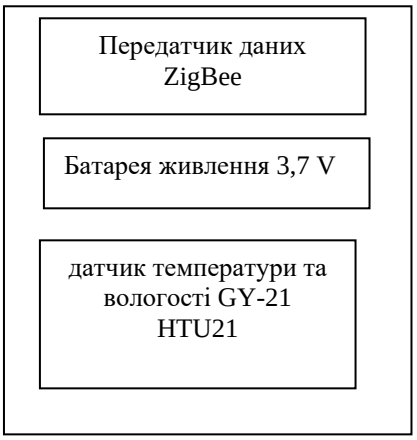


Рис. 1. Структурна схема маркеру

Маркер складається з трьох основних частин: передатчика ZigBee, батареї живлення номіналом 3,7V та датчиків температури та вологості GY-21 HTU21, дана структурна схема наведена на рис.1.

На основі даної структури й було побудовано систему збору, опрацювання та відправки даних на сервер. З таких маркерів формується сенсорна мережа, яка збирає данні про вологість та температуру на всіх ділянках поля де встановлені датчики та надсилає їх на мікрокомп'ютер для подальшого опрацювання.

Після збереження показників з сенсорів у власній базі даних MySQL мікрокомп'ютер формує JSONE масив з усіх зібраних даних від маркерів, плюс додає до нього час збору даних у форматі «Y-m-d h:i», свої gps координати lat, lng та секретний ключ за допомогою якого сервер дізнається який з мікрокомп'ютерів надіслав дані. Також цей унікальний ключ дає змогу забезпечити безпеку при прийомі їх від мікрокомп'ютерів. Після цього ці дані надсилаються на сервер за допомогою глобальної мережі інтернет, схема відправки даних зображена на рис. 2.

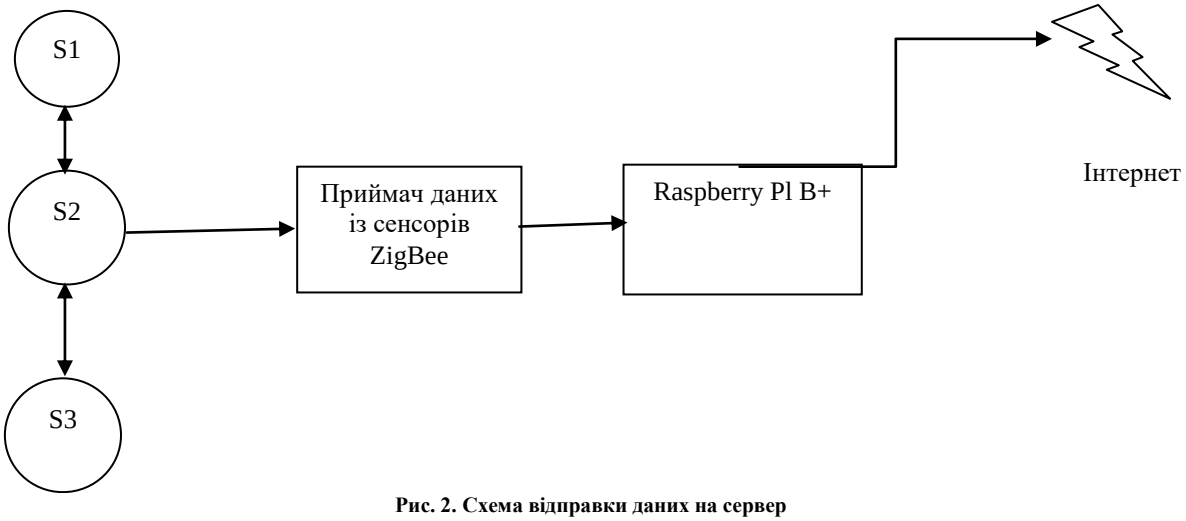


Рис. 2. Схема відправки даних на сервер

Після прийому даних сервер валідує їх валідатором Larevel фреймворку, перевіряє чи є токен вказаний в масиві в базі даних сервера і якщо всі дані проходять валідацію, вони зберігаються в базу даних MySQL. А на сервер відсилається відповідь, яка засвідчує про успішний прийом даних. Після проведення цих операцій користувач зможе побачити всі зібрані дані у вигляді графіків на сторінці своєї компанії. Відкривши свою сторінку вперше користувач може побачити карту місцевості на якій відбувається розстил та останні показники вологості і температури по всім сенсорам. Також, користувач може обрати тип зберігання або висушування, в залежності від чого будуть формуватися нотифікації про досягнення бажаних показників вологості, або про відхилення від показників температури та вологості більш ніж на 10%. Однією з додаткових функцій даної методики є те, що користувач сам може обрати з яких датчиків він саме хоче перевірити вологість чи температуру, дані миттєво відобразяться на його сторінці. На комп'ютер надсилається також інформація про відсутність зв'язку з датчиками та коли заряд батареї маркера складає менше 20%.

При досягненні оптимальної температури висушування стебел луб'яної сировини та вологості 19% користувачу надходить повідомлення про те, що процес висушування припинено, та які оптимальні параметри для збору розстилу було досягнено та з якими показниками сировину можна відправляти на зберігання, або готувати до подальшої переробки. Дана методика застосовується й далі при зберіганні та підготовці сировини до переробки з метою збереження всіх якісних властивостей майбутнього лубоволокнистого волокна та виробів з нього. Дана програма створена в англомовній та українській версіях, з розрахунку як на вітчизняного, так і на закордонного споживача (представників промислового комплексу з переробки луб'яної соломи або трести).

Висновки. У світовому виробництві екологічно чистої продукції, луб'яна сировина займає лідируюче місце, як джерело натуральної сировини, адже воно відрізняється своїми гігієнічними, медико-біологічними та захисними властивостями, збереження яких повинно відбуватися на всіх етапах технологічного процесу переробки. Виконана наукова робота, направлений на розв'язання цієї проблематики і покликана забезпечити вітчизняні текстильні виробництва сучасними системами контролю якості луб'яної сировини для випуску якісних виробів, конкурентоздатних не тільки на ринку України. Розроблені інформаційні технології, що водночас контролюють та зберігають високі показники якості сировини для лубоволокнистих матеріалів, матимуть вагоме наукове значення як для України, так і для світової наукової спільноти, та виведуть на якісний новий науковий рівень існуючі уявлення як вітчизняних, так і закордонних вчених у галузі легкої промисловості.

За результатами проведених досліджень заплановано розробити сучасні автоматизовані системи контролю якості на всіх технологічних стадіях переробки лубоволокнистої сировини аж до виходу готової продукції. Також, буде вдосконалено існуючий програмний продукт з контролю та підтримки всіх якісних показників луб'яної сировини, який дасть змогу вітчизняним переробним підприємствам реалізовувати якісні конкурентоспроможні вироби.

На основі отриманих результатів будуть розроблені методичні рекомендації щодо впливу вологості та температури луб'яної сировини на якість готової продукції.

Література

1. Бойко Г.А. Технічні коноплі: перспективи розвитку ринку в Україні / Г.А. Бойко, Г.А. Тіхосова, А.В. Кутасов // Товары и рынки : международный научно-технический журнал. – 2019. – № 2 (30). – С. 41–51.

2. Бойко Г.А. Унікальні споживні властивості технічних конопель / Г.А. Бойко, О.М. Мандра А.О. Тіхосова // The 6th International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" (February 19-21, 2020) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2020. – P. 382–386.

3. Бойко Г.А. Вітчизняний та європейський досвід з переробки без наркотичних конопель / Г.А. Бойко, Л.А. Чурсіна, Т.О. Кузьміна // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2017. – № 2(61). – С. 76–78.

4. Томилова М.В. Исследование влияния влажности на стабильность структуры плетеных полотен при сдвиге / М.В. Томилова, Н.А. Смирнова // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016) : сборник материалов Международной научнотехнической конференции. Часть 2. – М. : ФГБОУ ВО «МГУДТ», 2016. – С. 98–101.

5. Машарипов Ш.М. Анализ современных методов и технических средств измерения влажности хлопковых материалов / Ш.М. Машарипов // Научный журнал «Приборы». – М., 2016. – № 4 (190). – С. 31–37.

6. Тіхосов А.С. Розробка системи контролю вологості на базі мікрокомп'ютера raspberry PI B+ / А.С. Тихосов, Ф.М. Цивільський, В.Г. Шерстюк // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – № 2 (61). – С. 228–233.

7. Петин В.А. Микрокомпьютеры Raspberry Pi: Практическое руководство / В.А. Петин. – СПб : БХВ-Питербург, 2015. – 240 с.

References

1. Boiko H.A. Tekhnichni konopli: perspektyvy rozvytku rynku v Ukraini / H.A. Boiko, H.A. Tikhosova, A.V. Kutasov // Tovarы y rыnky : mezhdunarodnыi nauchno-tekhnycheskyi zhurnal. – 2019. – № 2 (30). – S. 41–51.

2. Boiko H.A. Unikalni spozhyvni vlastyvosti tekhnichnykh konopel / H.A. Boiko, O.M. Mandra A.O. Tikhosova // The 6th International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" (February 19-21, 2020) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2020. – R. 382–386.

3. Boiko H.A. Vitchyznianyi ta yevropeiskyi dosvid z pererobky bez narkotychnykh konopel / H.A. Boiko, L.A. Chursina, T.O. Kuzmina // Vestnyk Khersonskoho natsyonalnoho tekhnycheskoho unyversyteta. – 2017. – № 2(61). – S. 76–78.

4. Tomilova M.V. Issledovanie vliyaniya vlazhnosti na stabilnost struktury pletenyh poloten pri sdvige / M.V. Tomilova, N.A. Smirnova // Dizajn, tehnologii i innovacii v tekstilnoj i legkoj promyshlennosti (INNOVACII-2016) : sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchnotehnicheskoj konferencii. Chast 2. – M. : FGBOU VO «MGUDT», 2016. – S. 98–101.

5. Masharipov Sh.M. Analiz sovremennyh metodov i tehnicheskih sredstv izmereniya vlazhnosti hlopkovyh materialov / Sh.M. Masharipov // Nauchnyj zhurnal «Pribory». – M., 2016. – № 4 (190). – S. 31–37.

6. Tikhosov A.S. Rozrobka systemy kontroliu volohosti na bazi mikrokompiutera raspberry PI B+ / A.S. Tykhosov, F.M. Tsyvilskyi, V.H. Sherstiuk // Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – 2017. – № 2 (61). – S. 228–233.

7. Petin V.A. Mikrokompyutery Raspberry Pi: Prakticheskoe rukovodstvo / V.A. Petin. – SPb : BHV-Piterburg, 2015. – 240 s.

Надійшла / Paper received : 24.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-258-264
УДК 675.266; 675.04

А.А. АТАМАНОВА, Т.О. КОЛЕСНИК, О.А. АНДРЕЄВА
Київський національний університет технологій та дизайну

СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ВИКОРИСТАННЯ ФЕРМЕНТІВ

Метою даної роботи є аналіз сучасних досліджень властивостей та практичного використання ферментів. За результатами аналізу літературних джерел та власних досліджень показано перспективність дослідження та використання ферментів й одержаних на їх основі ферментних препаратів у різних галузях промисловості, оскільки це сприяє підвищенню якості готової продукції та рівня екологізації виробництва, більш раціональному використанню сировинних та матеріальних ресурсів.

Ключові слова: ферменти, властивості, використання.

A.A. ATAMANOVA, T.O. KOLESNYK, O.A. ANDREYEVA
Kyiv National University of Technologies and Design

MODERN RESEARCH ON THE PROPERTIES AND USE OF ENZYMES

The purpose of this work is to analyse modern studies of the properties and practical use of enzymes. Among the environmentally effective materials that are widespread in various sectors of the economy, enzymes occupy a special place – biologically active protein substances of plant, microbial and animal origin. Due to their high catalytic activity, specificity and diversity, they are used in medicine, pharmacy, agro-industrial complex, food, and textile and leather industries. The suitability of enzyme preparations for practical use is determined by the nature of both the enzyme itself and the substrate on which it acts, as well as the environmental conditions on which the effectiveness of these materials depends. Based on the results of the analysis of literary sources and our own research, the prospects for the study and use of enzymes and enzyme preparations obtained on their basis in various industries are shown, since this contributes to an increase in the quality of finished products and the level of green production, more rational use of raw materials and material resources. The results of the researches, which provide for the widespread use of enzymes in the processing of leather raw materials into materials, the essence of which is the modification of collagen materials in the form of leather raw materials and semi-finished products. Enzymatic processing of raw materials is a promising direction for improving biotechnological processes in the production of leather and fur. Compared to other methods, the processing of hides using enzymes is more rational, which ensures high quality: softness, lightness, plasticity. In addition, enzymatic processing contributes to an increase in the yield of a semi-finished product in terms of area, an increase in labor productivity, and in general provides a significant economic effect.

Keywords: enzymes, properties, application.

Вступ

Нові економічні умови, що склалися на Україні, призвели до того, що найбільш актуальними стали питання екологічності та безпечності технологій та матеріалів, які використовуються при виготовленні тих чи інших товарів. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є використання біотехнологій із застосуванням ферментів. З існуючих у природі близько 25 тисяч різних ферментів на сьогоднішній день описано трохи більше трьох тисяч найменувань і ще менша їх кількість використовується. Завдяки високій каталітичній активності, специфічності та різноманітності ці речовини застосовуються у медицині, фармації, агропромисловому комплексі, харчовій, текстильній та шкіряній промисловості [1–3].

Ферменти є надзвичайно ефективними каталізаторами, здатними прискорювати хімічні реакції в сотні разів. Як і всі білки, вони мають ряд характерних властивостей: амфотерність, електрофоретичну рухливість, їм притаманні особливості структурної організації білкових молекул (первинний, вторинний, третинний і четвертинний рівні організації). Деякі ферменти (наприклад, протеази, ліпази, рибонуклеаза) є простими білками, які побудовані з поліпептидних ланцюгів і розкладаються при гідролізі переважно на амінокислоти. У більшості випадків ферменти є складними білками, у структурі яких поряд з білковою частиною присутній небілковий компонент (простетична група). Каталітична активність ферментів пов'язана з наявністю активного центру − чітко орієнтованого у просторі комплексу функціональних груп білка (іноді за участю іонних кофакторів та коферментів), здатних до вибіркової хемосорбції молекул субстрату з утворенням єдиного комплексу, всередині якого перебігають хімічні реакції (відбувається перерозподіл електронів, руйнування існуючих або утворення нових зв'язків).

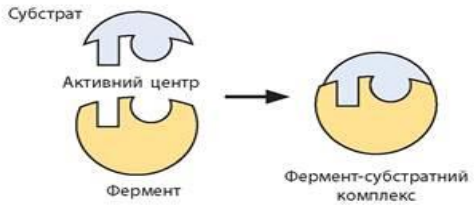


Рис. 1. Утворення фермент-субстратного комплексу

Необхідною стадією ферментативного каталізу є з'єднання ферменту Ес з субстратом S, в результаті чого утворюється фермент-субстратний комплекс ES (рис. 1).

В процесі ферментативного каталізу розпізнають такі три стадії (рис. 2):

1. Дифузія субстрату до ферменту з утворенням первинного фермент-субстратного комплексу (ES);

2. Перетворення первинного комплексу на один або кілька активованих фермент-субстратних комплексів (ES *, ES ** ...);

3. Відокремлення продукту реакції (Р) від активного центру та дифузія його у навколишнє середовище.

Перша стадія зазвичай нетривала й залежить від концентрації субстрату у середовищі, а також від його дифузії до активного центру ферменту. Комплекс утворюється практично миттєво. Друга стадія найбільш повільна й лімітує швидкість всього каталізу в цілому. Її тривалість залежить від енергії активації даної хімічної реакції. По завершенні реакції (кінцевий стан) фермент-субстратний комплекс розпадається на продукт (продукти) реакції та фермент. Третя стадія практично миттєва й визначається швидкістю дифузії продуктів реакції у навколишнє середовище. Після закінчення реакції фермент повертається до свого вихідного стану та знову здатний взаємодіяти з новою молекулою субстрату [4, 5].

Рис. 2. Стадії ферментативного каталізу

Оскільки розробка більшості інноваційних технологій у всіх сферах промисловості пов'язана з пошуком, дослідженням та впровадженням сучасних хімічних матеріалів, на кафедрі біотехнології, шкіри та хутра Київського національного університету технологій та дизайну проводяться комплексні дослідження у цьому напряму, у тому числі з модифікації біогенної сировини (шкірного покриву тварин та його складових або похідних, целюлози і т.і.) [6–11].

Метою даної роботи є аналіз сучасних досліджень властивостей та практичного використання ферментів для обґрунтування напряму подальших науково-прикладних розробок на підставі одержаної інформації.

Виклад основного матеріалу

Будь-які технологічні процеси проходять під впливом різних факторів. Тому для виявлення області практичного використання біокаталізаторів важливим аспектом є вивчення поведінки, стабільності біологічно-активних систем, знаходження оптимальних параметрів режиму їх роботи. Виходячи з цього, авторами проаналізована наукову-технічна література останніх років, у якій наведена інформація про ферменти як білкові речовини із специфічними функціями, особливості їх одержання та практичне використання.

У роботі [12] досліджено вплив різних факторів (концентрації субстрату казеїну й тривалості гідролізу останнього за різних концентрацій, pH середовища на протеолітичну активність як нативного, так і іммобілізованого сичужного ферменту пепсину. З цією метою автори використали гідролітичні ферменти різної каталітичної дії: амілолітичні, які мають високу специфічність щодо глікозидних зв'язків, та протеолітичні, які мають відносну специфічність щодо пептидних зв'язків. За результатами проведених досліджень встановлено значення pH середовища, в межах яких ферменти виявляють максимальну активність. Так, оптимальне значення активності ферментів амілолітичної дії складає pH 5-6, протеолітичної – 7-9. Також визначено температурні межі активності досліджуваних ферментів, вплив на їх активність деяких активаторів та інгібіторів

Додатковим джерелом цінних харчових і біологічно активних речовин можуть служити відходи, що утворюються в результаті глибокої переробки риб. На підставі вивчення масового складу ставкових риб Волзько-Каспійського рибогосподарського басейну (білий амур, короп, товстолобик) авторами [13] виявлено, що основний обсяг рибних відходів становить кісткова тканина (близько 62,8 %) та внутрішні органи (21,2 %). В результаті проведеного експерименту встановлено хімічний склад внутрішніх органів (печінка, серце, кишковик, жовчний та плавальний міхури, молоки, ікра) об'єктів дослідження. Показано, що раціональним підходом до використання кісткової тканини є отримання структуроутворюючих елементів, зважаючи на значний вміст колагену (40,5 % від загальної кількості білкових речовин), з подальшим отриманням з них мінеральних добавок завдяки високому вмісту мінеральних сполук (25,9 % від загального хімічного складу). Внутрішні органи білого амура та корона характеризуються високим вмістом білка, що дозволить використовувати їх для отримання білкових комплексів, у тому числі комплексів протеолітичних ферментів і клеєвмісних препаратів, а внутрішні органи товстолобика, що відрізняються високим вмістом жиру, – для отримання біопалива та ліполітичних ферментів.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить про актуальність використання ферментів та ферментів препаратів у різних галузях економіки, у тому числі у шкіряному виробництві, суть якого полягає у модифікації колагенвмісних матеріалів у вигляді шкіряної сировини та напівфабрикату. До прикладу, ферментні препарати протеолітичної, глікозидної та ліполітичної дії доцільно використовувати у відмочувально-зольних процесах [14], тоді як процес знезолювання може бути здійснений за допомогою ферментів LITHUDACL та NovoBateWB, які активні в кислому середовищі [15]. Для проведення процесу знежирювання та підвищення його ефективності можуть бути використані лужні ліпази або комбінація лужних протеаз і ліпази [16]. Перспективним для процесу зневолошування шкурок кроля є ферментний препарат протосубтилін Г10х [17, 18]. Протеолітичні ферменти можуть бути використані для переробки хромвмісних відходів [19].

У публікації індійських вчених повідомляється про нову кератиназу від Bacillus subtilis, яка може замінити сульфід натрію під час зневолошування шкіряної сировини. Синтезований в лабораторних умовах

фермент виявив високу швидкість каталітичної дії, яку визначали за різних значень pH і температури. Фермент, вироблений в пілотному масштабі, застосували при дії таких саме чинників in vitro (спектрофотометрично), а також in vivo (для зневолошування відмоченої козячої шкури). Протеолітична активність ферменту, продукованого в синтетичному середовищі барвника при 5,3 мг/мл сухої маси клітин, становила 548 од/мл. Активність ферменту in vitro зросла з підвищенням температури від 25 до 35 °С й досягла максимуму при температурі 45 °С, pH 11. У порівнянні з відомим сульфідним методом індекс зневолошування був досягнутий після семигодинної обробки відмоченої козлини [20].

У Воронезькому державному університеті за допомогою методів ІЧ-спектроскопії та гравіметрії досліджено характер зв'язування інулази з носієм та стан води у фазі сорбенту. Розраховано параметри водневих зв'язків, що характеризують зв'язок ферменту з носієм при абсорбційній іммобілізації, вивчено вплив іммобілізації на зміну конформації білка [21].

Винахід [22] відноситься до біотехнології й стосується ферментативної обробки шкур великої рогатої худоби та свиней при виготовленні натуральних шкір. Суть винаходу полягає у способі ферментативного зневолошування шкур великої рогатої худоби та свиней у розчині ферменту колагенолітичної протеази з гепатопанкреасу краба у кількості 0,001-0,005 % від маси сировини та подальшому золінні з використанням сульфіду натрію у кількості 0,5-1,1 % від маси сировини. Порівняно з відомими цей спосіб має ряд переваг, які полягають у виключенні витрати поверхнево-активних речовин та сульфітів; скороченні у 10 разів витрати ферменту колагенази та мінімум у два рази − сульфіду натрію; у багаторазовому використанні ферментного розчину з підкріпленням; в отриманні більш м'яких шкір; у зниженні трудових витрат під час відмочування та зоління, значному поліпшенні економічної ситуації на підприємстві, скороченні непродуктивних витрат за рахунок зниження штрафних санкцій за перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, що викидаються у стічні води.

Під керівництвом проф. Антипової Л. В. проведено підбір ферментів мікробного та тваринного походження для виділення та очищення функціональних біополімерів, а також шкіряних матеріалів. Встановлено їх вихідну активність, обґрунтовано оптимальну кількість та умови дозування. Запропоновано технологічні схеми отримання риб'ячої шкіри, сухого та замороженого колагену, препаратів гіалуронової кислоти [23].

У бразильській Laboratory of Leather and Environmental Studies досліджено можливість застосування ферментного екстракту, виділеного штамом Bacillus subtilis, у поєднанні з пероксидом водню для видалення волосся з коров'ячої шкури. Протестовано дві концентрації ферментативного екстракту (100 і 300 од/1 г шкури) та дві концентрації пероксиду водню (4 і 8 %). Стан шкур оцінювали візуально, а стічні води аналізували за вмістом загального азоту, фіксованих та летючих розчинних твердих речовин, глікозаміногліканів, протеогліканів та гідроксипроліну. Авторами було встановлено, що окисно-ферментативне видалення волосся не викликає його руйнування та скорочує тривалість процесу у порівнянні зі звичайним та ферментативним зневолошуванням. Результати виконаної роботи показали, що окисно-ферментативне зневолошування може бути життєздатною альтернативою застосуванню вапна та сульфіду натрію [24].

На думку авторів [25], за попередні роки ферментативні процеси стали незамінними у шкіряному виробництві, оскільки роблять шкіру м'якою, еластичною та гладкою. При цьому у якості основної сировини для м'якшення використовуються різноманітні засоби − від собачого посліду, голуб'ячих фекалій до синтетичних ферментів. Використання природних матеріалів досить складне, а якість продукції є невідтворюваною та нестабільною, не кажучи вже про низьку культуру виробництва. Шкіра може бути перем´якшеною чи недом´якшеною в залежності від активності пом´якшувача та вмісту ферментів у використаних матеріалах. Протягом багатьох років поширеним матеріалом для виготовлення м'яких шкіряних виробів була коров´яча підшлункова залоза, змішана з речовиною-носієм у відповідній концентрації, що забезпечує активність близько 1300 одиниць. З урахуванням цього автори порівняли шкіру, отриману із застосуванням цього традиційного матеріалу, зі шкірою, виробленою із застосуванням поширеного комерційного матеріалу для м'яких виробів (Oropon, Rohm та Haas) за якістю, міцністю та м'якістю. У роботі використали різні композиції, починаючи від 0,5 % з інтервалом від 0,25 до 1,50 % у перерахунку на масу вапна. Дослідні групи порівнювались з контрольною, у якій використали 0,5 % комерційного пом´якшувача, активність якого складає 1500 одиниць, що підтверджено результатами аналізу. Під час експерименту 72 мокросолені шкури овець та кіз були розділені навпіл на дві групи, у кожній групі по шість шкур кожного типу. Після відмочування, зневолошування, вапняного зоління, знезолювання, м'якшення, пікелювання, хромового дублення, додублювання, сушіння та оздоблення одержали шкіру гарної якості, яка не відрізнялася від шкіри, виробленої з використанням імпортних матеріалів.

Як відомо [26], для ефективної обробки шкіряної сировини необхідно, щоб мікроструктура дерми після відмочування наближалася до мікроструктури парних шкур. При цьому з відмочених шкур повинні бути видалені всі забруднення, а також розчинні білки у вигляді альбумінів та глобулінів. Механізм обводнення шкур пов'язують з основною міжволоконною речовиною, яка обволікає волокнисті елементи дерми. Через наявність епідермісу вода та інші хімічні речовини надходять до шкури з боку підшкірно-м'язового шару. Для обводнення висушеної шкури треба зруйнувати додаткові зв'язки, що утворилися при сушінні, та розчинити мукополісахариди, що склеюють структурні елементи. Для цього слід провести довготривале або двостадійне відмочування. У разі останнього варіанту при першому відмочуванні

використовуються такі реагенти як антисептики, загострювачі та поверхнево-активні речовини (ПАР); при другому − антисептики, ПАР та ферментний препарат. Значення pH відмочувального розчину не повинно перевищувати 5,5 [27]. Останнім часом більшість методик пропонують проведення процесу відмочування з використанням ферментних препаратів. Для більш ефективної дії на міжволоконну речовину краще використовувати ферментні препарати, що володіють комплексом різних активностей, наприклад, препарати із серії мальтаваморинів: П2х, Пп10х, Г10х.

При використанні ферментних добавок під час відмочування завдяки гідролізу міжволоконних речовин зростає монолітність шкіряної сировини при одночасному покращенні її проникності та доступності для хімічних матеріалів. Це сприяє кращому обводненню сировини, спрощує міздріння, внаслідок чого зменшується вірогідність пошкодження шкур [28].

У Казанському технологічному університеті проведено серію експериментів [29–31], присвячених використанню ферментних препаратів під час відмочування шкур бобра великих розмірів.

Автори роботи [32] роблять наголос на тому, що обов'язковою умовою при роботі з ферментними препаратами є техніка безпеки. Потрібно звертати увагу на розчинність ферментів, що використовуються у вигляді порошку. При пересипанні та зважуванні порошку утворюється пил, який може викликати алергічні захворювання.

У роботі [33] зазначається, що свіжий, непрозолений та необроблений нейтральними солями колаген руйнується панкреатином. Для підтвердження цього шматок шкури обробляли панкреатином при температурі 40 °С. Втрати азоту склали 27 %. Дослідження ізольованих колагенових волокон з мікроскопічним контролем у камері з підігрівом показали, що вони розчиняються після п′ятигодинної обробки 5-відсотковим розчином панкреатину при температурі 40 °С. При цьому через розчинення проміжної речовини нативні волокна колагену спочатку розпадаються на елементарні волокна, а потім − на окремі відрізки, які переходять у розчин.

Використання під час м'якшення шкіри електрохімічно активованої води (католіту) та вітчизняного ферментного препарату Bacillussp зменшує величину питомого об'єму макро- та мікропор та збільшує величину питомого об'єму ультрамікропор полішару порівняно з використанням католіту та польського ферментного препарату «ChemizymBH». При використанні дистильованої води ця різниця дуже мала. Тому у готовій натуральній шкірі, при м'якшенні якої використали розчин одного з досліджуваних ферментних препаратів в електрохімічно активованій воді, спостерігаються інші фізико-механічні та релаксаційно-деформаційні характеристики [34].

У роботах [35, 36] доведена можливість використання ферментів під час фарбування текстильних матеріалів, котонізації лляного волокна та для надання біостійкості вовняним матеріалам. Різноманітні за походженням та будовою типи ферментів використовуються на різних (підготовчих, основних та заключних) стадіях обробного текстильного виробництва. Автори обґрунтували можливість використання препаратів різної каталітичної дії для інтенсифікації процесу фарбування лляної тканини прямими барвниками за низьких температур, показали вибіркову дію ферментів в залежності від хімічної будови прямих барвників.

У технології виробництва спирту з крохмалевмісної сировини пріоритетним напрямом є дослідження та розробка інноваційних енерго- та ресурсоощадних технологій, які дозволяють знизити температуру термо-ферментативної обробки замісів та забезпечити більш глибокий гідроліз біополімерів зерна за рахунок використання комплексу ферментних препаратів селективної дії [37].

За участю авторів даної роботи досліджено низку комерційних ферментних препаратів [38], активність яких визначали за методом осадження казеїну. Експериментально встановлено, що значення pH їх водної витяжки знаходиться на рівні 5,2–6,5, активність – в межах 59,8–109,8 од./г. Найбільш активними виявились препарати Rinazym та КАВ (109,8 та 100,0 од./г відповідно). Оскільки рідинні процеси шкіряного виробництва супроводжуються постійною зміною pH середовища (наприклад, процеси відмочування та м'якшення проводяться переважно у нейтральному середовищі, зоління-зневолошування – у лужному, пікелювання та хромове дублення − у кислому і т.і.), цікаво було визначити активність задіяних у роботі ферментних препаратів у широкому діапазоні pH: від низького, який відповідає сильно кислому середовищу, до високого (сильно лужне середовище). За результатами експерименту встановлено, що у кислому середовищі (pH 4,01) всі досліджувані ферментні препарати інактивуються, оскільки порівняно з вихідним станом (pH 5,2-6,5) їх активність зменшується у два-десять разів. Крім того, зроблено висновок, що препарати Rinazym та КАВ більш активні в діапазоні pH 5,2-9,18. Препарат Ribez максимальну активність виявляє у сильно лужному середовищі (pH 12,45). Препарати ON-2 та B-2 більш активні при pH 6,86, проте, у сильно лужному середовищі вони більш активні, ніж у вихідному стані. У подальшому, при дослідженні процесу відмочування шкіряної сировини з використанням зазначених ферментних препаратів за різних умов, встановлено, що краще обводнення овчини досягається в присутності 0,5 % ферментного препарату B-2 та 1,5 % карбонату натрію, це дозволяє повністю виключити використання екологічно небезпечного сульфіду натрію [39].

Висновки

За результатами аналізу літературних джерел та власних експериментальних доробок показано доцільність дослідження та використання ферментів й одержаних на їх основі ферментних препаратів у різних галузях промисловості, оскільки це сприяє підвищенню якості готової продукції та рівня екологізації виробництва, більш раціональному використанню сировинних та матеріальних ресурсів. Планується

проведення подальшої роботи з розширеним асортиментом ферментовмісних матеріалів різного походження, у тому числі одержаних з промислових відходів.

Література

1. Биссвангер Х. Практическая энзимология / Х. Биссвангер. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 328 с.
2. Волова Т. Г. Введение в биотехнологию: электрон. учеб. пособие / Т. Г. Волова. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
3. Грачева И. М. Технология ферментных препаратов / И. М. Грачева, А. Ю. Кривова. – М. : Изд-во «Элевар», 2000. – 512 с.
4. Андреєва О. А. Фізика та хімія протеїнів : підручник / О. А. Андреєва. – К. : КНУТД, 2003. – 224 с.
5. Колпак С. В. Дослідження впливу технологічних умов на активність ферментів / С. В. Колпак, О. В. Скропишева, В. П. Гнідець // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 6 (56). – С. 47–50.
6. Андреєва О. А. Дослідження структури та властивостей колагенвмісного препарату / О. А. Андреєва, Л. А. Майстренко, А. В. Ніконова // Наукові праці НУХТ. – 2018. – № 5 (24). – С. 38–43.
7. Данилкович А. Г. Біотехнологічні процеси в технології формування шкіряних матеріалів / А. Г. Данилкович, В. І. Ліщук, О. А. Охмат // Наукові праці НУХТ. – 2018. – № 5 (24). – С. 14–24.
8. Охмат О. А. Білкові трансформації в біополімерах тваринного походження / О. А. Охмат, О. Р. Мокроусова, Л. А. Майстренко // Наукові праці НУХТ. – 2018. – № 6 (24). – С. 59–64.
9. Фордзюн Ю. І. Модифіковані волокнисто-сітчасті матеріали типу «шкіркартон» на основі колагену та целюлози. Перспективні матеріали та інноваційні технології: біотехнологія, прикладна хімія та екологія / Ю. І. Фордзюн, О. А. Андреєва. – К. : Світ Успіху, 2020. – С. 445–455.
10. Первая Н. В. Дослідження нових хімічних матеріалів для рідинного оздоблення шкіри / Н. В. Первая, О. А. Андреєва // Вісник КНУТД. Технічні науки. – 2020. – № 1 (142). – С. 71–85.
11. Pervaia N. V. The rationale behind using natural polymeric materials in shoe production / N. V. Pervaia, O. A. Andreyeva, L. A. Maistrenko // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. – 2019. – Vol. 500. – P. 1–6.
12. Степанова Л. С. Дослідження впливу субстрату на активність іммобілізованого пепсину / Л. С. Степанова, І. А. Піголь // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 240–243.
13. Самойлова Д. А. Вторичные ресурсы рыбной промышленности как источник пищевых и биологически активных добавок / Д. А. Самойлова, М. Е. Цибизова // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. – 2015. – С. 129–136.
14. Justa Širvaitytė. Bating of pelts after deliming with peracetic / Justa Širvaitytė, Virgilijus Valeika, Kęstutis Beleška, Violeta Valeikienė // Proc. Estonian Acad. Sci. Chem. – 2006. – Vol. 55. – P. 93–100.
15. Altan Afsar. Studies on the degreasing of skin by using enzyme in liming process / Altan Afsar, Fatma Cetinkaya // Indian Journal of Chemical Technology. – 2008. – Vol. 15. – P. 507–510.
16. Суховеркова А. М. Современные методы получения обезволошенных шкурок кролика / А. М. Суховеркова, Л. В. Антипова, И. С. Косенко, О. А. Василенко // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 3, Ч. 2. – С. 74–75.
17. Антипова Л. В. Ферментная технология обезволашивания шкурок кролика / Л. В. Антипова, О. А. Василенко, И. С. Косенко, А. М. Суховеркова // Вестник Воронежской государственной технологической академии. – 2008. – № 3 (37). – С. 61–65.
18. Choundhary R. B. Enzyme technology applications in leather processing / R. B. Choundhary, A. K. Jana, M. K. Jha // Indian Journal of Chemical Technology. – 2004. – Vol. 11. – P. 659–671.
19. Сысоев В. А. Ферменты и их использование в технологии кожи и меха / В. А. Сысоев. – Казань : Изд-во КГТУ, 2002. – 33 с.
20. Saritha K. Protease enzyme: an eco-friendly alternative for leather industry / K. Saritha // Indian Journal of Science and Technology. – 2009. – № 12. – P. 29–32.
21. Шкутина И. В. ИК-спектроскопия для исследования комплекса индулаза-носитель / И. В. Шкутина, О. Ф. Стоянова, В. Ф. Семёнов // Вестник ВГУ. Химия, биология, фармации. – 2004. – № 1. – С. 110–113.
22. Пат. RU 2061046. Способ ферментативного обезволашивания шкур / Козловский А. С., Артюков А. А., Козловская Э. П., Сенчило Л. Н., Анишкова З. Л., Сахаров И. Ю., Федосов Ю. В. ; патентообладатель: Козловский А. С., Артюков А. А., Козловская Э. П., Сенчило Л. Н., Анишкова З. Л., Сахаров И. Ю., Федосов Ю. В. – Дата подачи заявки: 20.06.1994 ; дата публикации патента : 27.05.1996.
23. Антипова Л. В. Выбор ферментных препаратов для обработки рыбных шкур / Л. В. Антипова, А. В. Соколов, М. Д. Горбунков // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2014. – № 1. – С. 48–53.
24. Andrioli E. Associated Use of Enzymes and Hydrogen Peroxide for Cowhide Hair Removal / E. Andrioli, M. Gutterres // JALCA. – 2014. – 109(2). – P. 41–48.
25. Ahmed M. M. Application of an enzymatic bate from local materials / M. M. Ahmed, G. A. Gasmelseed // Environmental Chemistry Letters. – 2020. – P. 747–769.
26. Левенко П. И. Химия и технология отмочно-зольных процессов / П. И. Левенко. – М. : Легкая индустрия, 1976. – 200 с.

27. Абдуллин И. Ш. Химия и технология кожи и меха / И. Ш. Абдуллин, Л. Н. Абуталипова, А. В. Островская. – Казань : Изд-во КГТУ, 2002. – 72 с.

28. http://www.taxidermy.su/news1/2012/otmoka_shkur/.

29. Берселева М. Ю. Исследование совместного влияния ферментных препаратов и плазменной обработки на процесс отмоки шкур бобра / М. Ю. Берселева, Г. Г. Лутфуллина, И. Ш. Абдуллин // КОП. – 2012. – № 1. – С. 28–30.

30. Берселева М. Ю. Особенности процессов выделки шкур / М. Ю. Берселева, Г. Г. Лутфуллина, И. Ш. Абдуллин, А. А. Ягафарова // Новые технологии и материалы в производстве кожи и меха : сб. статей IX Междунар. научно-практ. конференции студентов и молодых ученых. – Казань : КНИТУ. – 2013. – С. 138–143.

31. Берселева М. Ю. Ферментативная отмока шкур бобра / М. Ю. Берселева, Г. Г. Лутфуллина, И. Ш. Абдуллин, Е. А. Солдаткина, Л. Б. Журавлев // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 13. – С. 61–62.

32. Шестакова И. С. Ферменты в кожевенном и меховом производстве / И. С. Шестакова, Т. Ф. Моисеева, Т. Ф. Миронова. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 128 с.

33. http://main.isuct.ru/files/publ/PUBL_ALL/146.pdf.

34. Стаценко Д. В. Вплив спільної дії ферментних препаратів і активованих розчинів на вологообмінні властивості- натуральної шкіри / Д. В. Стаценко, О. О. Романюк, О. А. Матвієнко // Вісник КНУТД. – 2013. – № 1. – С. 74–80

35. http://www.snab.e.

36. Чечина І. Г. Вплив ферментів різної каталітичної дії на сорбцію прямих барвників лляною тканиною / І. Г. Чечина, О. В. Скропишева, Г. В. Міщенко, О. М. Чабан // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – № 3. – С. 51–53.

37. Шиян П. Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика / П. Л. Шиян, В. В. Сосницький, С. Т. Олійнічук. – К. : Видавничий дім «Асканія», 2009. – 424 с.

38. Колесник Т. О. Дослідження властивостей сучасних ферментних препаратів / Т. О. Колесник, А. В. Ніконова, О. А. Андреєва // Зб. тез XVIII Всеукраїн. науков. конф. молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», Київ, 18-19 квітня 2019 р. – С. 414–415.

39. Колесник Т. О. Дослідження процесу відмочування шкіряної сировини в присутності ферментних препаратів / Т. О. Колесник, О. А. Андреєва // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – №3 (267). – С. 251–254.

References

1. Bisswanger H. Practical enzymology. M.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2015. 328 p.

2. Volova T. G. Introduction to biotechnology: electron. textbook allowance. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008.

3. Gracheva I. M., Krivova A. Yu. Technology of enzyme preparations. M: Izd-vo «Elevar», 2000. 512 s.

4. Andreeva O. A. Physics and chemistry of proteins: a textbook. K., 2003. 224 p.

5. Kolpak S. V., Skropysheva O. V., Gnidets V. P. Research of influence of technological conditions on activity of enzymes. Eastern European Journal of Advanced Technology. 2012. V. 2. № 6 (56). P. 47–50.

6. Andreeva O. A., Maistrenko L. A., Nikonova A. V. Study of the structure and properties of collagen-containing drug. Scientific works of NUHT. 2018. № 5 (24). P. 38-43.

7. Danilkovich A. G., Lishchuk V.I., Ohmat O. A. Biotechnological processes in the technology of formation of leather materials. Scientific works of NUHT. 2018. № 5 (24). P. 14-24.

8. Ohmat O. A, Mokrousova O. R, Maistrenko L. A. Protein transformations in biopolymers of animal origin. Scientific works of NUHT. 2018. № 6 (24). P. 59-64.

9. Fordyun Y. I., Andreeva O. A. Modified fibrous mesh materials such as "leather cardboard" based on collagen and cellulose. Promising materials and innovative technologies: biotechnology, applied chemistry and ecology. K: World of Success, 2020. P. 445-455.

10. Pervaya N. V., Andreeva O. A. Research of new chemical materials for liquid finishing of leather. Bulletin of KNUTD. Technical sciences. 2020. №1 (142). P. 71-85.

11. Pervaia N. V., Andreyeva O. A., Maistrenko L. A. The rationale behind using natural polymeric materials in shoe production. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 500. P. 1–6.

12. Stepanova L. S., Pigol I. A. Investigation of the effect of substrate on the activity of immobilized pepsin. Bulletin of KhNU. Technical sciences. 2010. №2. P. 240-243.

13. Samoilova D. A., Tsibizova M. E. Secondary resources of the fishing industry as a source of food and biologically active additives. Bulletin of AGTU. Series: Fisheries, 2015. P. 129-136.

14. Justa Širvaitytė, Virgilijus Valeika, Kęstutis Beleška, Violeta Valeikienė. Bating of pelts after deliming with peracetic. Proc. Estonian Acad. Sci. Chem. 2006. Vol. 55. P. 93–100.

15. Altan Afsar, Fatma Cetinkaya. Studies on the degreasing of skin by using enzyme in liming process. Indian Journal of Chemical Technology. 2008. Vol. 15. P. 507–510.

16. Sukhoverkova A. M., Antipova L. V., Kosenko I. S., Vasilenko O. A. Modern methods of obtaining hairless rabbit skins. Modern problems of science and education. 2009. №3, Ch.2. P. 74–75.

17. Antipova L. V., Vasilenko O. A., Kosenko I. S., Sukhoverkova A. M. Enzyme technology of hair removal of rabbit skins. Bulletin of the Voronezh State Technological Academy. 2008. №3 (37). P. 61–65.

18. Choundhary R. B., Jana A. K., Jha M. K., Choundhary R. B. Enzyme technology applications in leather processing. Indian Journal of Chemical Technology. 2004. Vol. 11. P. 659–671.

19. Sysoev V. A. Enzymes and their use in the technology of leather and fur. Kazan: KSTU Publishing House, 2002. 33 p.

20. Saritha K. Protease enzyme: an eco-friendly alternative for the leather industry. Indian Journal of Science and Technology. 2009. Vol.2 №12. P. 29-32.

21. Shkutina I. V., Stoyanova O. F., Semenov V. F. IR spectroscopy for the study of the indulase-carrier complex. VGU Bulletin. Series: Chemistry, Biology, Pharmacy, 2004. №1. P. 110-113.

22. Pat. RU 2061046. The method of enzymatic hair removal / Kozlovsky A. S., Artyukov A. A., Kozlovskaya E. P., Senchilo L. N., Anishkova Z. L., Sakharov I. Yu., Fedosov Yu. V.; Patent holder: Kozlovsky A. S., Artyukov A. A., Kozlovskaya E. P., Senchilo L. N., Anishkova Z. L., Sakharov I. Yu., Fedosov Yu. V.; Date of application submission: 20.06.1994; date of patent publication: 27.05.1996.

23. Antipova L. V., Sokolov A. V., Gorbunkov M. D., Storublevtsev S. A. The choice of enzyme preparations for the treatment of fish skins. Technologies of food and processing industry of agro-industrial complex - products of healthy food. 2014. № 1. P. 48–53.

24. Andrioli E., Gutterres M. Associated Use of Enzymes and Hydrogen Peroxide for Cowhide Hair Removal. JALCA. 2014. 109 (2). P. 41-48.

25. Ahmed M. M, Gasmelseed G. A. Application of an enzymatic bate from local materials. Environmental Chemistry Letters. 2020. P. 747-769.

26. Levenko P. I. Chemistry and technology of soaking and ash processes. M: Light Industry, 1976. 200 p.

27. Abdullin I. S., Abutalipova L. N., Ostrovskaya A. V. Chemistry and technology of leather and fur. Kazan: KSTU Publishing House. 2002. 72 p.

28. http://www.taxidermy.su/news1/2012/otmoka_shkur/.

29. Berseleva M. Yu., Lutfullina G. G., Abdullin I. Sh. Investigation of the joint effect of enzyme preparations and plasma treatment on the process of soaking beaver skins. Leather and shoe industry. 2012. №1 P. 28-30.

30. Berseleva M. Yu., Lutfullina G. G., Abdullin I. Sh., Yagafarova A. A. Peculiarities of skins manufacturing processes. New technologies and materials in the production of leather and fur: Sat. Articles IX International. scientific practice. conference of students and young scientists. Kazan: KNITU. 2013. P. 138–143.

31. Berseleva M. Yu., Lutfullina G. G., Abdullin I. Sh., Soldatkina E. A., Zhuravlev L. B. Enzymatic soaking of beaver skins. Bulletin of Kazan Technological University. Kazan. 2012. №13. P.61-62.

32. Shestakova I. S., Moiseeva T. F., Mironova T. F. Enzymes in leather and fur production. M: Legprombytizdat, 1990. 128 p.

33. http://main.isuct.ru/files/publ/PUBL_ALL/146.pdf.

34. Statsenko D. V., Romanyuk O. O., Matvienko O. A. Influence of joint action of enzyme preparations and activated solutions on moisture exchange properties of genuine leather. Bulletin of KNUTD. 2013. № 1.

35. http: //www.snab.e.

36. Chechina I. G., Skropysheva O. V., Mishchenko G. V., Chaban O. M. Influence of enzymes of different catalytic action on sorption of direct dyes by linen fabric. Eastern European Journal of Advanced Technology. 2008. № 3. P. 51–53.

37. Shiyan P. L., Sosnitsky V. V., Oliinichuk S. T. Innovative technologies of the alcohol industry. Theory and practice. K: Askania Publishing House. 2009. 424 p.

38. Kolesnyk T. O., Nikonova A. V., Andreeva O. A. Research of properties of modern enzyme preparations / Coll. theses of the XVIII All-Ukraine. of Sciences. conf. of young scientists and students "Scientific developments of youth at the present stage", April 18-19, 2019. Kyiv: KNUTD. 2019. P. 414-415.

39. Kolesnyk T. O., Andreeva O. A. Investigation of the process of soaking leather raw materials in the presence of enzyme preparations. Herald of Khmelnytskyi National University. 2020. № (267) P. 251-254.

Надійшла / Paper received : 10.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-265-269
УДК 677.075:004.94

Т.В. ЄЛІНА, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ У ПРОГНОЗУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРИКОТАЖУ

Попри значні досягнення у сфері моделювання структури текстильних матеріалів, задача забезпечення можливості застосування програмно-аналітичних комплексів для прогнозування властивостей трикотажу ускладнюється великою кількістю невирішених питань, серед яких відсутність стандартизованих методик досліджень у сфері 3D моделювання та симуляції фізичних процесів у текстильних матеріалах, способів верифікації моделей, відсутність баз даних фізико-механічних властивостей текстильних матеріалів.

У ході роботи проаналізовано сучасні підходи до створення моделей структури трикотажу та вимоги до таких моделей з точки зору можливості їх подальшого використання у віртуальних експериментах. Розроблено загальну схему прогнозування властивостей трикотажу з використанням тривимірних геометричних моделей його структури. Сформульовано та запропоновано дотримуватись таких п'яти принципів моделювання структури трикотажу: принцип виробничої доцільності, принцип параметризації, принцип декомпозиції, принцип реалістичності та принцип раціонального використання інформаційних ресурсів. Для реалізації принципу раціонального використання інформаційних ресурсів розроблено алгоритм дворівневого проєктування з використанням моделей мезо- та макрорівнів.

Відомо, що дослідження властивостей трикотажу за допомогою його тривимірних геометричних моделей не завжди потребують деталізації на рівні ниток. Текстильні полотна відносяться до гетерогенних систем. Дворівневе проєктування передбачає необхідність використання моделей з деталізацією на рівні ниток (моделей мезорівня) на початковому етапі для виокремлення елементарного структурного фрагменту, за допомогою якого можуть бути розраховані гомогенізовані фізичні характеристики. На наступному етапі трикотажне полотно або виріб подається у систему проєктування у вигляді макромоделей як оболонка заданої товщини, фізико-механічні характеристики якої приймаються з розрахунку попереднього етапу.

Ключові слова: трикотаж, прогнозування властивостей, тривимірне моделювання, дворівневе проєктування, макромоделі.

T.V. YELINA, L.YE. HALAVSKA
Kyiv National University of Technologies and Design

USE OF COMPUTER TOOLS IN FORECASTING THE PROPERTIES OF KNITWEAR

The paper presents the results of analysis of scientific research and publications in the field of development of three-dimensional geometric models of knitted structures, current issues of designing knitwear with given properties, the capabilities of modern computer tools. Despite significant advances in 3D modelling of textile materials, the challenge of providing the possibility of using simulation software to predict the properties of knitwear is complicated because of a large number of unresolved issues, including the lack of standardized research methods in 3D modelling and simulation of physical processes in textile materials, verification methods, lack of databases of physical and mechanical properties of textile materials, etc. Modern approaches to the creation of models of knitted structures are being explored as well as the requirements to such models from the point of view of the possibility of their further use in virtual experiments. A general diagram for predicting the knitwear properties by means of three-dimensional geometric modelling has been developed. The following five principles of three-dimensional geometric modelling of the knitted structures are suggested as follows: the principle of production feasibility, the principle of parameterization, the principle of decomposition, the principle of realism, and the principle of rational use of information resources. To implement the latter principle, a two-level design algorithm using meso- and macro-level models have been developed. As is known, the study of the properties of knitwear using its three-dimensional geometric models may not always require the use of yarn level models. Textile fabrics belong to heterogeneous systems. Two-level design presupposes the need to use the yarn level models (Meso level models) at the initial stage to explore the elementary structural fragment, which can be used to calculate homogenized physical characteristics. At the next stage, the model of the knitted fabric or product is transmitted into the design system under the form of macro models, as a shell of a given thickness, the physical and mechanical characteristics of which are taken from the calculation of the previous stage.

Keywords: *knitting, property forecasting, 3D modelling, two-level design, macro models.*

Вступ

Сучасні універсальні програмно-аналітичні комплекси дозволяють досліджувати й аналізувати фізичні, механічні, експлуатаційні властивості об'єктів за допомогою їх тривимірних комп'ютерних моделей, однак, застосування цих засобів до аналізу та прогнозування властивостей текстильних виробів ускладнюється рядом факторів. До таких факторів можна віднести нестабільність геометричних характеристик структури, анізотропію властивостей, відсутність баз даних фізико-механічних характеристик матеріалів та інші. Дослідження у сфері 3D моделювання структури трикотажу стрімко розвиваються впродовж останніх десятиліть, проте, говорити про впровадження у повсякденну практику науковців програмних засобів аналізу фізико-механічної поведінки трикотажу шляхом проведення віртуальних експериментів поки що зарано. Підвищити ефективність роботи зі створення спеціальних методик та алгоритмів визначення фізико-механічних характеристик трикотажу можна шляхом застосування системного підходу та дотримання загальних принципів, сформульованих на підставі аналізу вимог у сфері виготовлення трикотажу з прогнозованими властивостями та можливостей сучасних комп'ютерних технологій.

Постановка задачі

В сучасній інженерній практиці виникає необхідність у прогнозуванні механічної та термічної поведінки текстильних композитів, так званих штучних м'язів, компресійних виробів [1, стор.257] і т. ін. На функціональні властивості таких виробів впливають як геометричні характеристики структури, зокрема, розмір та характер розташування міжниткових проміжків (пор), так і пружність полотна – тиск, що створює полотно на тіло людини. У роботі [2] застосовано структурний підхід до моделювання трикотажних переплетень з деталізацією на рівні ниток, зі збереженням топологічної відповідності структури та урахуванням пружних властивостей ниток, а також відтворення реалістичної динаміки деформацій готового трикотажного виробу. Однак для практичного застосування цієї моделі необхідно сформувати базу даних властивостей ниток та формалізований опис фізичних моделей їхньої взаємодії у різних комбінаціях елементів структури трикотажу. У процесі виготовлення текстильні матеріали проходять шлях від волокна до готового текстильного виробу та, відповідно до ланцюга технологічних перетворень, відбувається трансформація геометричних характеристик та фізичних властивостей. З метою розробки ефективних методик прогнозування властивостей трикотажних виробів з використанням тривимірних геометричних моделей їх структури в публікаціях останніх років [1, 2, 3, 4] підкреслюється необхідність забезпечення можливості поетапного проєктування з використанням моделей різного рівня [1]. У контексті прогнозування композиційних матеріалів на текстильній основі розрізняють макро-, мезо- та мікрорівні ієрархії об'єктів моделювання [3], причому макрорівнем вважають рівень композиційного виробу, мезорівнем – рівень текстильного наповнювача, а мікрорівнем – рівень волокон. У роботах [5, 6] автори розкривають сучасні підходи до моделювання процесів фільтрації крізь текстильні матеріали різної структури. Актуальним завданням у сфері прогнозування властивостей текстильних фільтрувальних матеріалів буде створення спеціальних інструментів для швидкого відтворення їх дизайну та визначення граничних умов для оптимізації видалення твердих часточок із суспензії [1, стор.317]. Важливим показником ефективності методик моделювання є оптимальне співвідношення між часом, необхідним для моделювання, що залежить від складності моделі та точністю, якої потребує обрана реалізація алгоритму [1, стор.388].

Результати досліджень

Аналіз літературних джерел показує, що окремі теоретичні питання моделювання фізико-механічної поведінки трикотажу залишаються ще невирішеними, тому поки що не можна говорити про запровадження практики комп'ютерного моделювання фізико-механічної поведінки трикотажу в умовах виробництва. Завданням даної роботи є вивчення структури даних та знань у сфері моделювання й прогнозування властивостей трикотажу та встановлення оптимальних підходів до розробки методик прогнозування на концептуальному рівні. У результаті виконання даного етапу визначено гілки алгоритму, які раніше відносились до так званих відкладених рішень. Пошук способів вирішення та розширення сфери застосування відпрацьованих та готових до впровадження гілок алгоритму.

Загальна схема використання 3D моделей у процесі прогнозування характеристик трикотажу [7] показана на рис.1. Дані про параметри його структури надходять у систему моделювання, що дозволяє згенерувати у віртуальному середовищі тривимірну модель із заданою точністю. Далі, в інтегрованому програмному середовищі, модель імпортують у розрахунковий комплекс для моделювання процесів, що відбуваються в текстильному матеріалі у тих чи інших умовах.

Рис. 1. Схема оцінки відповідності властивостей трикотажу технічним завданням з використанням 3D моделей його структури

Трикотажні полотна та вироби являють собою матеріали зі складною внутрішньою геометрією. Особливості розташування нитки в структурі трикотажу істотно впливають на фізико-механічні, гігієнічні

та інші властивості готового виробу. Тому успішне вирішення завдання аналізу властивостей трикотажу за допомогою тривимірних геометричних моделей його структури безпосередньо залежить від достовірності передачі в комп'ютерній моделі геометричних характеристик нитки. Споживні властивості готового трикотажного виробу послідовно формуються в процесі виготовлення. При цьому властивості пряжі залежать від властивостей волокон, а також від способу прядіння, крутки, апретування і т. ін. У свою чергу, властивості трикотажного полотна залежать не тільки від властивостей пряжі, але, й від виду переплетення, параметрів режиму в'язання, технології обробки. Іншими словами, властивості готового трикотажу значною мірою залежать від того, яку просторову конфігурацію приймає відрізок нитки, який до в'язання мав прямолінійну форму. Тому розробку систем автоматизованого проєктування трикотажу, що передбачають тривимірне геометричне моделювання його структури, необхідно проводити із дотриманням певних принципів, що враховують особливості моделювання трикотажу як матеріального об’єкта. На підставі проведеного аналізу підходів до геометричного моделювання структури трикотажу нами запропоновані наступні принципи.

Принцип виробничої доцільності [7] полягає у тому, що у вихідних даних для моделювання слід використовувати довжину нитки у петлі, яка є регульованим параметром [8]. Залежно від цілей створення тривимірних моделей структури трикотажу можливе використання різних наборів вихідних даних. При цьому слід враховувати, що для цілого ряду віртуальних експериментів принциповим є збіг довжини центральної лінії нитки-моделі та довжини нитки в елементі структури реального трикотажу. Далі проведення різноманітних віртуальних експериментів може забезпечити підбір такого значення довжини нитки у петлі, при якому трикотаж буде проявляти необхідні споживні властивості. При цьому отримання трикотажу із заданою довжиною нитки у петлі легко забезпечується в умовах виробництва.

Принцип параметризації. За елемент структури приймається ділянка нитки, конфігурація якої може бути представлена просторовою кривою, що задана параметрично [7]. У цьому випадку особливості просторового розташування нитки на кожній окремо взятій ділянці належать до геометричних властивостей нитки на даній ділянці. Спочатку кожна ділянка нитки являє собою прямолінійний відрізок. У процесі в'язання і після нього в результаті взаємодії з петлетвірними органами машини, а також з іншими ділянками нитки дана ділянка набуває нових властивостей – вона певним чином зігнута і займає певну позицію у полотні. Крім того, слід взяти до уваги той факт, що використання тривимірної моделі забезпечує можливість моделювання деформацій. На початковому етапі розтягування трикотажного полотна його деформування відбувається шляхом перерозподілу нитки в елементах структури трикотажу. Тому дотримання даного принципу дозволяє використовувати математичну базу, розроблену для трикотажу у вільному стані, також для моделювання структури трикотажу в процесі деформації. З точки зору топології, позиція кожної ділянки в полотні щодо інших ділянок залишається незмінною. Вона визначається тим, в якому петельному ряді та якою голкою цю ділянку нитки було вв’язано в структуру трикотажу. А ось кривизна даної ділянки між точками контакту може змінюватися, як і відстані між точками контакту, залежно від стану трикотажу, властивостей ниток, їх взаємного розташування і зусиль розтягнення.

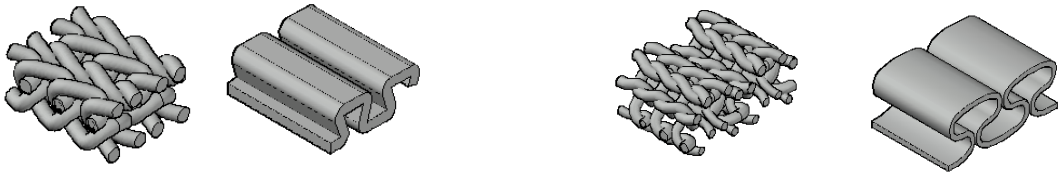
Однією з найважливіших характеристик трикотажу, що визначають його властивості, є переплетення трикотажу. При цьому рухливість структури, нерівномірність товщини ниток, а також безліч інших факторів, що впливають на характер розподілу волокнистої маси за площею і по товщині полотна, ускладнюють завдання теоретичного опису геометрії волокон і ниток в структурі трикотажу. Дослідження трикотажних полотен підтверджують, що саме від розмірних характеристик структурної одиниці, розподілу маси в площі й об'ємі та від її сировинного складу залежать всі основні фізико-механічні характеристики текстильного матеріалу. Таким чином, можна зробити висновок про те, що для формалізації даних про взаємне переплетення ниток повинна використовуватися спеціальна система кодування, яка дозволяє визначити адресацію точок контакту ниток і приналежність ниток, переплетених в певній точці, тій чи іншій системі. Модель, яка зображує топологію нитки в структурі трикотажу без урахування фізико-механічних властивостей сировини та геометричних характеристик окремих елементів, прийнято вважати топологічною моделлю.

Принцип декомпозиції процесу побудови моделі полягає у тому, що запис рівняння центральної лінії нитки у віртуальній моделі трикотажу слід проводити у два етапи [7]. На першому етапі будується топологічна модель. На другому етапі задається характер зміни кривизни осьової лінії нитки на кожній ділянці. Для вирішення деяких завдань проєктування достатньо мати запис рівняння центральної лінії нитки на кожній її ділянці. Однак, сфера використання такої моделі не включає теплових, гідродинамічних і деяких інших видів розрахунків. Тому у випадку, коли мова йде про створення повнофункціональної тривимірної геометричної моделі структури трикотажу, необхідно враховувати закономірності зміни форми поперечного перерізу нитки на різних її ділянках у структурі трикотажу.

Принцип реалістичності. У тривимірній геометричній моделі структури трикотажу необхідно врахувати зміну форми поперечного перерізу нитки уздовж її центральної лінії [7]. У теорії геометричного моделювання структури кулірного трикотажу, викладеної проф. О.С. Далідовичем, приймалося припущення про те, що нитка має круглий поперечний переріз і її діаметр не змінюється вздовж осьової лінії нитки. Однак на сьогодні проблема побудови релевантних тривимірних моделей різних за структурою та властивостями ниток вимагає перегляду прийнятих раніше методів. За ступенем деталізації опису структури самої нитки, пров'язаної в трикотаж, існують різні підходи, від ідеалізації та подання форми поперечного

перерізу у вигляді кола до відтворення в комп'ютерній моделі комплексної нитки окремих елементарних ниток та навіть волокон. Тим часом ускладнення моделі призводить до значного збільшення обчислювального навантаження на комп'ютер і до збільшення часу побудови моделі. Тому *принцип раціонального використання інформаційних ресурсів* можна сформулювати наступним чином: у віртуальних моделях трикотажу репрезентативний об'єм нитки може бути представлений суцільним тілом, а внутрішня пористість сировини врахована у вигляді відповідних коефіцієнтів [7].

Вимоги до рівня деталізації тривимірної моделі структури трикотажу формуються відповідно до мети створення цієї моделі та сфери її майбутнього застосування. Для моделювання таких споживних характеристик як теплозахисні властивості, тиск одягу на тіло людини, розтяжність, пружність та деяких інших, доцільно використовувати моделі трикотажу, що не містять деталізації на рівні ниток (так звані поверхневі моделі). Під поверхневими моделями можна розуміти моделі трикотажу, що повторюють геометрію його поверхні без деталізації на рівні ниток. На рис. 2 наведено тривимірні моделі трикотажу переплетень ластик 1+1 (рис. 2 а) та ластик 2+2 (рис. 2 б) з деталізацією на рівні ниток та без такої деталізації.



а **б**

Рис. 2. Моделі трикотажу переплетень ластик 1+1 (а) та ластик 2+2 (б)

У контексті розв'язання задачі моделювання процесу одновісної деформації трикотажу прийнято припущення про можливість моделювання деформацій розтягу трикотажу ластичних переплетень з використанням моделі саме макрорівня. У залежності від алгоритмів та мети моделювання фізичних процесів, трикотаж може бути представлений як оболонка певної товщини, що характеризується заданими показниками пористості, пружності, гігроскопічності, теплопровідності, жорсткості, драпірувальності та ін. У системах моделювання одягу тканина чи трикотаж подаються як текстильні оболонки. Для їх опису використовують математичний апарат, призначений для роботи з поверхнями з різною кривизною. Прийняте припущення дозволяє використовувати поверхневі моделі для моделювання одноосної деформації та значно скоротити час на перебудову моделей. На рис. 3 наведено зображення окремих дискретних станів під час поступової трансформації макромоделі трикотажу переплетення ластик 2+2 під дією розтягуючих зусиль, прикладених у напрямку петельних рядів.

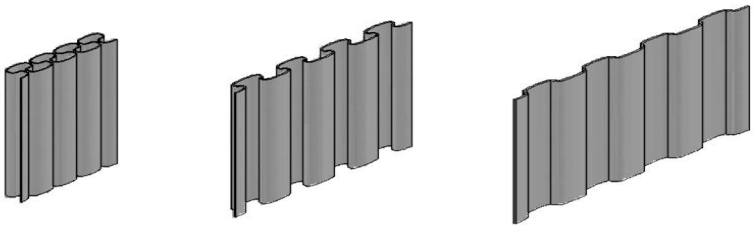


Рис. 3. Використання поверхневої моделі трикотажу переплетення ластик 2+2 для моделювання деформації розтягу вздовж петельних рядів

Висновки

У ході роботи досліджено вимоги, що висуваються до процесу проєктування та тривимірного геометричного моделювання трикотажу з метою прогнозування властивостей полотен та виробів. Встановлено, що рівень деталізації моделі залежить від мети прогнозування, вихідних умов для проведення віртуальних та реальних експериментів, наявності розрахункових баз та алгоритмів, відомостей про попередню верифікацію моделей. Сформульовано принципи тривимірного геометричного моделювання структури трикотажу. Для дотримання принципу раціонального використання інформаційних ресурсів запропоновано використання алгоритму дворівневого проєктування, коли у рамках одного дослідження можуть використовуватись як моделі мезорівня (перший етап), так і моделі макрорівня (другий етап).

Подяка. Робота виконувалась у рамках спільного українсько-литовського науково-дослідного проєкту «Трикотажні матеріали для засобів індивідуального захисту від механічних пошкоджень та дії полум'я (акронім – PERPROKNIT)» за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Література

1. Chen X (Eds). Modelling and predicting textile behavior. Woodhead Publishing Series in Textiles: No

94. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010, 536 p.

2. Kaldor J., James D.L., and Marshner S. Simulating knitted cloth at the yarn level. Proceedings of SIGGRAPH 2008, Los Angeles, California, 2008.

3. Lomov S., Dufort L., Luca P.D., and Verpoest I. Meso-macro integration of modeling of stiffness of textile composites. Proceedings of 28th International Conference of SAMPE Europe, Porte de Versailles Expo, Paris, 2007, 4003-4008.

4. Lomov S., Gusakov A., Huysmans G., Prodromou A., and Verpoest I. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. Composites Science and Technology, 2000, Vol. 60 (11), pp. 2083–2095.

5. Nazarboland M.A., Chen X., Hearle J. W. S., Lydon R. and Moss M. Modelling and simulation of filtration through woven media. Int J. Clothing Sci. Tech., 2008, Vol. 20(3), pp. 150–60.

6. Nazarboland M.A. Computer Simulation of Filtration Through Woven Fabrics, PhD Thesis, University of Manchester, 2008.

7. Автоматизоване проектування текстилю : [навч. посіб.] / [Т.В. Єліна, С.Ю. Боброва, Л.Є. Галавська, Т.А. Дзикович]. – Київ : Кафедра, 2017. – 280 с.

8. Труевцев А.В. Прикладная механика трикотажа : учебное пособие / А.В. Труевцев. – СПб : СПбГУТД, 2001. – 87 с.

9. House D., Breen D. Cloth Modelling and Animation. A K Peters, Natick, Massachusetts, 2000.

10. Loginov A., Grishanov S., Harwood R. Modelling the load-extension behavior of plain-knitted fabric. Part I: A unit-cell approach towards knitted-fabric mechanics. Jornal of the Textile Institute, 2002, Vol. 93 (Part 1, No. 3), P. 218–238.

References

1. Chen X (Eds). Modelling and predicting textile behavior. Woodhead Publishing Series in Textiles: No 94. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010, 536 p.

2. Kaldor J., James D.L., and Marshner S. Simulating knitted cloth at the yarn level. Proceedings of SIGGRAPH 2008, Los Angeles, California, 2008.

3. Lomov S., Dufort L., Luca P.D., and Verpoest I. Meso-macro integration of modeling of stiffness of textile composites. Proceedings of 28th International Conference of SAMPE Europe, Porte de Versailles Expo, Paris, 2007, 4003-4008.

4. Lomov S., Gusakov A., Huysmans G., Prodromou A., and Verpoest I. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. Composites Science and Technology, 2000, Vol. 60 (11), pp. 2083–2095.

5. Nazarboland M.A., Chen X., Hearle J. W. S., Lydon R. and Moss M. Modelling and simulation of filtration through woven media. Int J. Clothing Sci. Tech., 2008, Vol. 20(3), pp. 150–60.

6. Nazarboland M.A. Computer Simulation of Filtration Through Woven Fabrics, PhD Thesis, University of Manchester, 2008.

7. Avtomatyzovane proektuvannia tekstyliu : [navch. posib.] / [T.V. Yelina, S.Iu. Bobrova, L.Ie. Halavska, T.A. Dzykovych]. – Kyiv : Kafedra, 2017. – 280 s.

8. Truevcev A.V. Prikladnaya mehanika trikotazha : uchebnoe posobie / A.V. Truevcev. – SPb : SPbGUTD, 2001. – 87 s.

9. House D., Breen D. Cloth Modelling and Animation. A K Peters, Natick, Massachusetts, 2000.

10. Loginov A., Grishanov S., Harwood R. Modelling the load-extension behavior of plain-knitted fabric. Part I: A unit-cell approach towards knitted-fabric mechanics. Jornal of the Textile Institute, 2002, Vol. 93 (Part 1, No. 3), P. 218–238.

Надійшла / Paper received : 16.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-270-274
УДК 675.083 : 677.472.6

Л.А. МАЙСТРЕНКО, О.С. ЮНГІН, Л.О. ЛАСТОВЕЦЬКА
Київський національний університет технологій та дизайну

ЕКСТРАГУВАННЯ КОЛАГЕНУ З НЕДУБЛЕНИХ ВІДХОДІВ ШКІРЯНОГО ВИРОБНИЦТВА

Метою даної роботи було встановлення доцільності та можливості екстрагування колагену з недублених відходів підприємства з виготовлення натуральних шкір ПрАТ «Чинбар» (м. Київ) шляхом проведення кислотного гідролізу розчином оцтової кислоти. Отримано зразки водорозчинного колагену з золеної голинної обрізі, знезоленої голинної обрізі та міздрі. Встановлено найбільший вихід розчинного колагену у зразках, отриманих після його екстрагування зі знезоленої голини.

Ключові слова: колаген, відходи шкіряного виробництва, екстрагування колагену.

LESIA MAISTRENKO, OLGA IUNGIN, LIUDMYLA LASTOVETSKA
Kyiv National University of Technologies and Design

EXTRACTION OF COLLAGEN FROM NON-TANNED WASTES OF LEATHER PRODUCTION

The aim of paper is to establish the expediency and possibility of collagen extraction from non-tanned wastes of leather production by acid hydrolysis. The analysis of literature sources on the problems of the research was carried out, the peculiarities of collagen extraction from non-tanned collagen-containing wastes of leather production were established. Methods of the determination of collagen by the biuret method and total Nitrogen by the Kjeldahl method were used. Extraction of collagen from non-tanned wastes of leather production by proteins acid hydrolysis was performed. Samples of water-soluble collagen were obtained from limed pelt after trimming, delimed pelt after trimming and fleshings. The content of collagen and total Nitrogen was determined in the experimental samples. The highest amount of collagen was extracted from delimed pelt after trimming, the second place - pelt after trimming. The least amount of collagen was extracted from the fleshings. Such destribution of collagen amount from limed pelt after trimming and fleshings samples can be explained by the fact that part of the acetic acid from the solution is consumed to neutralize the calcium hydroxide present in the samples of these groups after the limming process. For the first time, the possibility of obtaining soluble collagen from samples of non-tanned collagen-containing wastes of the enterprise for genuine leather production "Chinbar" (Kyiv) was studied. The perspectives of using different wastes from leather production as a source of obtaining soluble collagen for further use for biomedical purposes were shown. Practical value: soluble collagen was obtained from non-tanned wastes of leather production: pelt after trimming and fleshings. The most promising for the extraction of collagen wastes from the tanning industry was described.

Key words: collagen, leather production waste, collagen extraction.

Постановка задачі

Шкіряна промисловість, одна з галузей, що забруднює навколишнє середовище через утворення значної кількості рідких і твердих відходів. Проблема перероблення та раціонального використання відходів шкіряного виробництва, особливо в останні роки, стає актуальною в усьому світі. Це пояснюється тим, що в процесі виробництва натуральних шкір утворюється велика кількість (30-50 % від маси сировини) відходів, в яких міститься до 50 % білкових речовин. Велика частина органічних відходів шкіряного виробництва ще не знайшла застосування і вивозиться на звалища, що, крім матеріальних втрат, веде до забруднення навколишнього середовища. За даними [1] з 1000 кг сировини при переробці шкіри утворюється до 850 кг твердих відходів, з них недублені відходи становлять 80 %, дублені – 20 %. Тверді недублені колагенвмісні відходи це – сировинна та голинна обрізь, а також міздря (підшкірна клітковина). Ці відходи містять дуже цінні природні органічні матеріали. Одним з яких є колаген – цінний білок, який можна вилучити і широко використовувати у вигляді колагенвмісних препаратів в різних галузях промисловості. Важливим моментом при цьому є дешевизна такого виду сировини. Таким чином, проблема перероблення колагенвмісних відходів шкіряного виробництва має два вирішальні чинники – екологічний та економічний.

Колаген – фібрилярний білок, який є основою сполучної тканини й становить близько 30 % від вмісту всіх білків організму ссавців [2]. Він міститься в шкірі, кістках, судинах, хрящах, дентині зубів тощо. Основна структурна одиниця колагену складається з трьох поліпептидних ланцюгів, розташованих у вигляді потрійної спіралі з двома однаковими ланцюгами (α1), та третім, який певною мірою відрізняється за своїм хімічним складом (α2), тобто це – гетерополімер. Усі типи колагену мають характерну потрійну спіраль, однак довжина спіралі, розмір та характер негвинтової частини змінюються залежно від типу [3]. Серед них 5 найпоширеніших: колаген типу I (шкіра, кістки, зуби, сухожилля, зв'язки, судинна лігатура, органи (основна складова органічної частини кістки); колаген типу II (очі та хрящі (основна складова хряща)); колаген типу III (сітчастий (головна складова ретикулярних волокон), шкіра, м'язи, судини); колаген типу IV (утворює секреційно-епітеліальний шар базальної мембрани та базальної пластинки); колаген типу V (волосся, клітинні поверхні, плацента). Колагени типу I, II та III є найбільш поширеними та добре дослідженими, їх використовують як пластичний матеріал у різних галузях медицини та косметології, а також у фармацевтичній промисловості як речовини, що продовжують дію лікарських засобів. У ссавців 95 % припадає на колаген типу I [2].

Аналіз досліджень та публікацій

Колаген можна добувати з різних видів тварин, його як правило, отримують від побічних продуктів забою тварин. Основними джерелами колагену є шкіра, сухожилля, хрящі та кістки. Деякі дослідження стосуються способів отримання колагену з різних тваринних джерел, таких як риби та птахи, як

альтернатива колагену з великої рогатої худоби (ВРХ) через ризик зоонозу, а також як альтернатива колагену, отриманому від свиней, для використання в мусульманських країнах. М'ясо є основним продуктом, отриманим від забою тварин, в той час як всі інші відходи та субпродукти класифікують як побічні продукти [4], включаючи кістки, сухожилля, шкіру, жирові тканини, роги, копита, ноги, кров та внутрішні органи. Вихід побічних продуктів, залежить від виду, статі, віку та маси тіла тварини. Вміст колагену в них коливається від 10–30 % у ВРХ, свиней та овець та від 5-6 % у птиці [5]. За даними [4] близько 40 % цих побічних продуктів є їстівними, а 20 % – неїстівними. Однак більшість побічних продуктів непридатні для споживання людиною. В результаті втрачається потенційне джерело доходу й зростають витрати на утилізацію відходів. В наш час зростає усвідомлення того, що ці побічні продукти можуть представляти цінні ресурси при правильному використанні. Неїстівні побічні продукти використовують при виробництві добрив, кормів для тварин та палива, а також для отримання мінералів, жирних кислот, вітамінів, гідролізатів колагену.

Виділення невирішених частин

Лише повністю або частково розчинний колаген може бути використаний у виробництві матриць для тканинної інженерії, порошків, губок, волокон або ниток. Розподіл молекулярної маси, структури та складу, а також функціональні особливості та властивості колагену залежать від умов перероблення сировини, з якої його отримують та матеріалів, що використовують в процесі екстрагування [6]. Тобто для кожного виду сировини потрібно підбирати параметри процесу, щоб отримати найкращі характеристики екстрагованого колагену. Завдяки надзвичайному розмаїттю тканин та типів колагену важко розробити стандартний метод його вилучення. Для екстрагування колагену необхідно видалити численні ковалентні внутрішньо- та міжмолекулярні поперечні зв'язки, які в першу чергу включають залишки лізину та гідроксилізину, ефірні зв'язки та інші зв'язки із полісахаридами. Процес вилучення та очищення колагену передбачає [7]: обробку сировини при температурі –25 °С або –4 °С; видалення неколагенових білків за допомогою хлориду натрію, гідроксиду натрію чи гідроксиду кальцію; нейтралізацію розчином хлоридної або оцтової кислот; обробку кислотою або ферментом; морфологічний аналіз; екстрагування колагену, включаючи діаліз з оцтовою кислотою або динатрієвим гідрофосфатом; аналіз амінокислотного складу, електрофорез, визначення температури денатурації, рентгенофракційний аналіз, УФ-спектральний аналіз.

Попередню обробку проводять для видалення неколагенових речовин та збільшення виходу колагену. Найчастіше проводять вилучення засноване на розчинності колагену в нейтральних сольових розчинах, кислих розчинах, а також кислих розчинах з доданими ферментами. Завдяки своїй будові колаген сполучної тканини розчиняється дуже повільно навіть у киплячій воді завдяки наявності великої кількості водневих зв'язків між суміжними молекулами. Тому для їх розриву використовують оброблення розведеними розчинами кислот та основ. Як наслідок ланцюги колагену залишаються неушкодженими, а поперечні зв'язки зазнають часткового гідролізу [10]. При *сольовому гідролізі* колагену використовують нейтральні сольові розчини хлориду натрію, трис-гідроксиметилу, амінометану гідрохлориду, фосфатів або цитратів.

При *кислотному гідролізі* сировину занурюють у розчин з кислою реакцією середовища. Коли розчин проникає в структуру шкіри, вона збільшується в об'ємі в два-три рази й відбувається гідроліз нековалентних між- та внутрішньомолекулярних зв'язків. Такий спосіб найкраще підходить для екстрагування колагену з сировини з нещільним переплетенням колагенових волокон, наприклад, при обробці шкур свиней та риб [11]. Кислотний гідроліз можна проводити з використанням органічних (оцтової, лимонної, молочної кислот) та неорганічних (хлоридної) кислот. Органічні кислоти здатні солюбілізувати незшиті колагени, а також порушити деякі поперечні зв'язки, що призводить до їх більш високої розчинності під час екстрагування [12].

Для екстрагування кислоторозчинного колагену попередньо оброблений матеріал додають до розчину кислоти, як правило, 0,5 М оцтової та витримують протягом 24-72 годин при постійному перемішуванні при температурі 4 °С, залежно від виду сировини. Після екстрагування проводять фільтрування для відділення супернатанту (залишку) від колагену, який знаходиться в рідкій фазі. Для отримання колагенового порошку фільтрат зазвичай піддають осадженню хлоридом натрію. Осад збирають центрифугуванням, а потім повторно розчиняють у мінімальному об'ємі 0,5 М оцтової кислоти, діалізують у 0,1 оцтовій кислоті протягом 2 днів та дистильованій воді протягом 2 днів із заміною розчину в середньому кожні 12 годин [13]. Під час очищення колагену потрібно усунути антигенні компоненти білка, представлені ділянками тілопептидних фрагментів колагену типу I. Таке очищення є більш ефективним після обробки пепсином. Ще однією проблемою є довготривалість процесу екстрагування, яка зазвичай становить від 1 до 3 тижнів, з високою втратою білка й частковою деградацією колагенових пептидів. З цієї причини корисність вилученого кислотою колагену обмежена, оскільки виділений матеріал повинен зберігатися в холодному розчині оцтової кислоти або сушитися. Максимальна концентрація колагену, яку можна отримати, також обмежена й становить 10 мг/мл [14]. Після кислотного гідролізу отримують нативну, тобто триспіральну, молекулу колагену з непошкодженими тілопептидами. Такий продукт здатний утворювати пружні гелі.

*Лужний гідрол*із полягає в обробці сировини основним розчином, як правило, гідроксидом натрію протягом періоду, який може зайняти від кількох днів до декількох тижнів [10]. Таку обробку проводять для товстих матеріалів, які потребують більш агресивної дії. Лужно-сольове екстрагування (обробка колагену лугом у присутності насиченого розчину сульфатнокислого натрію, а потім екстрагування кислотою) дає високий вихід

розчинного колагену зі збереженою потрійною спіраллю, однак з дезамінуванням залишків аспарагінової та глутамінової кислот, внаслідок чого розподіл зарядів уздовж триспіральної молекули колагену порушується й колаген втрачає здатність до фібрилоутворення, отже, такий колаген не утворює гелів [10].

Ферментативний гідроліз проводять протеазами: пепсином або трипсином, дія яких не руйнує потрійну спіраль, а лише неколагенові домени й неколагенові білки. Отримують нативную молекулу колагену з пошкодженими тілопептидами, здатну утворювати непружні гелі. Для вилучення колагену ферментативним гідролізом сировину, яка може бути залишком після кислотного вилучення колагену, додають до 0,5 М розчину оцтової кислоти, що містить ферменти. Суміш безперервно перемішують протягом 48 годин при 4 °С з подальшим фільтруванням. Фільтрат піддають осіданню та діалізу при тих же умовах, що й для отримання кислоторозчинного колагену [13]. Ферментативний гідроліз має деякі переваги порівняно з хімічним: специфічність, контроль ступеня гідролізу, помірні умови дії та менший вміст солі в кінцевому гідролізаті. Крім того, ферменти, як правило, можуть бути використані в дуже низьких концентраціях без обов'язкового видалення з середовища. Незважаючи на високу вартість ферментативного гідролізу, знижується кількість відходів, можливо контролювати процес, а продукт отримують з вищим вмістом колагену.

Спосіб екстрагування може впливати на довжину поліпептидних ланцюгів й функціональні властивості колагену, такі як в'язкість, розчинність, а також здатність утворювати гелі та емульсії. Однак за деякими свідченнями тільки колаген, отриманий після кислотного гідролізу, підходить для біотехнологічного використання й тканинної інженерії [8].

Формулювання цілей

В даній статті буде розглянуто вилучення колагену з недублених відходів шкіряного виробництва, а саме з голинної обрізі та міздрі. Об'єктами даного дослідження є зразки колагену, отримані з недублених відходів виробництва шкір для верху взуття з сировини великої рогатої худоби шкіряного заводу ПрАТ «Чинбар» (м. Київ). Для пошуку оптимального варіанту було обрано різні види відходів, а саме голинну обрізь після зоління (з), голинну обрізь після знезолювання (з/з) та міздрю, отриману після процесу зоління (м). У дослідних зразках відходів було визначено вміст основних складових: вологи, мінеральних речовин, загального азоту та гідроксиду кальцію (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний аналіз відходів недублених відходів шкіряного виробництва

№ з/п	Показник	Вид відходів		
		золена голинна обрізь	знезолена голинна обрізь	міздря
1	Масова частка, %: - вологи*	82,1	80,4	84,2
2	- мінеральних речовин*	10,7	3,3	31,7
3	- загального азоту*	14,3	15,0	5,4
4	- гідроксиду кальцію*	2,6	0,4	6,7

Примітка: * на абсолютно суху речовину

Підвищений вміст мінеральних речовин та гідроксиду кальцію у зразках золеної голини та міздрі може бути пояснений особливостями технологічного процесу виробництва шкіри, який передбачає обробку сировини у концентрованому розчині гідроксиду кальцію. Оскільки основною метою процесу знезолювання є вилучення гідроксиду кальцію з дерми вміст мінеральних речовин та гідроксиду кальцію у знезоленій голині менший у 3,2–9,6 та 6,5–16,8 разів відповідно. Найменший вміст загального азоту, який опосередковано свідчить про кількість колагену у структурі, виявлено у зразках міздрі.

Було досліджено зміну pH робочих розчинів на різних етапах екстрагування (рис. 1).

Вилучення колагену з дослідних зразків проводили шляхом їх обробки у 0,5 М розчині оцтової кислоти за схемою [9]: подрібнення зразків; промивання зразків у воді; осадження неколагенових білків 10-відсотковим розчином хлориду натрію; промивання зразків дистильованою водою до нейтрального pH; екстрагування колагену 0,5 моль/л розчином оцтової кислоти у присутності Трилону Б; фільтрування через паперовий фільтр; осадження колагену з фільтрату сухим хлоридом натрію (до концентрації останнього у розчині 1 моль/л); центрифугування; розчинення осадженого колагену у 0,5 М оцтовій кислоті. повторне осадження колагену сухим хлоридом натрію (до концентрації останнього у розчині 0,9 моль/л); центрифугування; розчинення осадженого колагену у найменшій кількості 0,1 М оцтової кислоти.

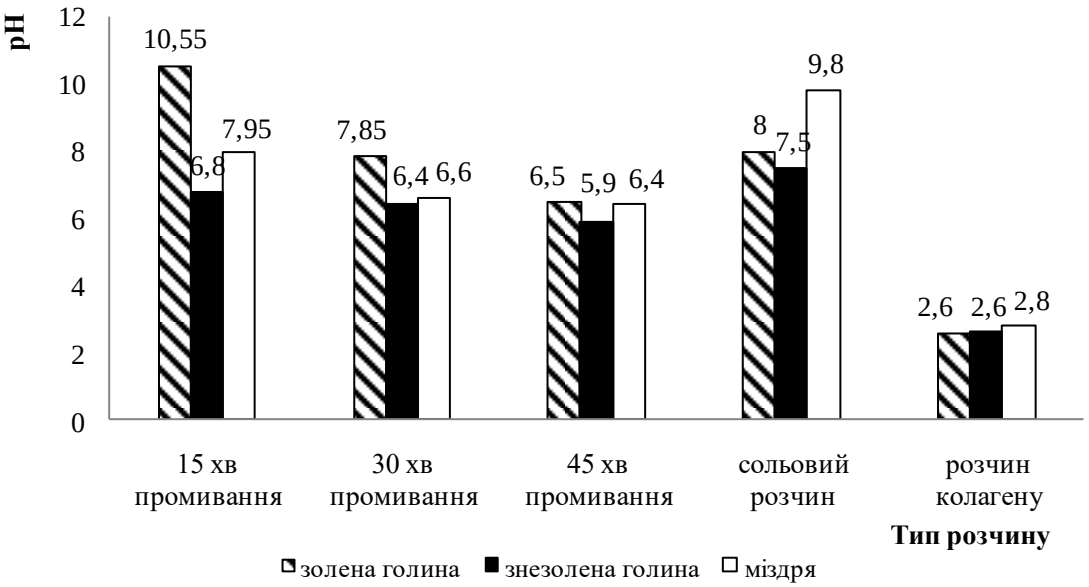


Рис. 1. Зміна pH робочих розчинів під час екстрагування

На рис. 2 представлено фотографії дослідних розчинів колагену на різних стадіях екстрагування.

Рис. 2. Фотографії зразків колагену на різних стадіях екстрагування: сольовий розчин (*ліворуч*), осаджений колаген (*праворуч*)

Основним критерієм оцінки ефективності екстрагування колагену, одержаного з колагенвмісних відходів шкіряної промисловості, було обрано кількість екстрагованого колагену, яку визначали на основі визначення вмісту білка в розчині колагену біуретовим методом на спектрофотометрі ULAB 102 (КНР) при довжині хвилі 540 нм та виходу загального азоту за методом К'єльдаля [15]. Дані щодо кількості одержаного колагену з різних видів відходів новедено у табл. 2. Найбільша кількість колагену була проекстрагована зі зразків знезоленої голини. Отримання меншої кількості колагену зі зразків золеної голини та міздрі може бути пояснене тим, що частина оцтової кислоти з розчину витрачається на нейтралізацію гідроксиду кальцію, наявного у зразках цих груп після процесу зоління (табл. 1).

Таблиця 2

Кількість колагену, отриманого після екстракції

№ з/п	Показник	Вид відходів		
		золена голинна обрізь	знезолена голинна обрізь	міздря
1	Об'єм розчину колагену після екстрагування, мл	18,0	48,0	12,5
2	Кількість азоту після екстрагування, мг	7,6	50,4	3,3
3	Кількість колагену після екстрагування, мг	10,1	25,3	3,0

В подальшому буде проведено аналіз амінокислотного складу та електрофорез, отриманих розчинів колагену.

Висновки

Переробка відходів шкіряного виробництва є невід'ємною частиною виробничого циклу та дозволяє вирішити або знизити гостроту екологічних та економічних проблем галузі. У статті досліджено можливість екстрагування колагену з недублених відходів виробництва натуральних шкір. Встановлено вищий у 4–8,4 рази вихід колагену зі зразків знезоленої голинної обрізі.

Література

1. Kanagaraj J., Velappan K. C., Chandra Babuand N. K. , Sadulla S. Solid wastes generation in the leather industry and its utilization for cleaner environment. Journal of Scientific & Industrial Research 2006. Vol. 65. pp. 541–548.

2. Истранов Л.П. Использование коллагенсодержащего сырья для медицинских и микробиологических целей / Л.П. Истранов, Л.Н. Бондарева // Лекарства, средства, экономика, технология и перспективы получения. – 1969. – № 4. – С. 1–43.

3. Miller E. J. Biomedical and industrial application of collagen in Extracellular Matrix Biochemistry, New York : Elsevier, 1984. P. 41–81.

4. Bhaskar N., Modi V.K., Govindaraju K., Radha C., Lalitha R. G. Utilization of meat industry by products: protein hydrolysate from sheep visceral mass. Bioresource Technology. 2007. Vol. 98 (2). P. 388–394.

5. Nollet L. M. L., Toldra F. Handbook of Analysis of Edible Animal By-Products. Gent, Belgium: CRC Press. 2011. P. 3–11.

6. Prestes R.C. Colageno e seus derivados: caracteristicas e aplicagoes em produtos carneos. Revista Unopar Cientffica Ciencias Biologicas e da Saüde. 2013. Vol. 15 (1). P. 65–74.

7. Mocan E., Tagadiuc O., Nacu V. Aspects of Collagen Isolation Procedure. Clinical Research Studies. 2011. № 2(320). P. 3–5.

8. Кухарева Л. В. Метод получения коллагена из телячьей шкуры для тканевой инженерии и клеточного культивирования /Л.В. Кухарева, И.И. Шамолина, Е.В. Полевая // Цитология. – 2010. – Том 52. – № 7. – Р. 597–602.

9. Kukhareva L. V., Shamolina I. I., Polevaya E. V. Metod polucheniya kollagena iz telyach'yey shkury dlya tkanevoy inzhenerii i kletochnogo kul'tivirovaniya. Tsitologiya. 2010. Tom 52. № 7. P. 597–602.

10. Savchuk O., Raksha N., Ostapchenko L., Mokrousova O., Andreyeva O. Extraction and Characterization of Collagen Obtained from Collagen-Containing Wastes of the Leather Industry. Solid State Phenomena. 2017. Vol. 267. pp. 172–176.

11. Prestes R.C. Colageno e seus derivados: caracteristicas e aplicagoes em produtos carneos. Revista Unopar Cientffica Ciencias Biologicas e da Saüde. 2013. Vol. 15 (1). P. 65–74.

12. Almeida P. F., Araüjo M. G. O., Santana, J. C. C. Collagen extraction from chicken feet for jelly production. Acta Scientiarum. Technology. 2012. Vol. 34(3). P. 345–351.

13. Liu D., Wei G., Li T., Hu J., Lu N., Regenstein, J. M., Zhou, P. Effects of alkaline pretreatments and acid extraction conditions on the acid-soluble collagen from grass carp (Ctenopharyngodon idella) skin. Food Chemistry. 2015. Vol.172. P. 836–843.

14. Wang L., Liang Q., Chen T., Wang Z., Xu J., Ma H. 2014. Characterization of collagen from the skin of Amur sturgeon (Acipenser schrenckii). Food Hydrocolloids. Vol. 38. P. 104–109.

15. Mocan E., Tagadiuc O., Nacu V. Aspects of Collagen Isolation Procedure. Clinical Research Studies. 2011. № 2(320). P. 3–5.

16. Головтеева А.А. Лабораторный практикум по химии и технологии кожи и меха : учебное пособие для вузов / Головтеева А.А., Куциди Д.А., Санкин Л.Б. – 3-е изд, перераб и доп. – М. : Легпромбытиздат, 1987. – 312 с.

References

1. Kanagaraj J., Velappan K. S., Chandra Babuand N. K. , Sadulla S. Solid wastes generation in the leather industry and its utilization for cleaner environment. Journal of Scientific & Industrial Research 2006. Vol. 65. pp. 541–548.

2. Istranov L.P. Ispolzovanie kollagensoderzhashego syrya dlya medicinskih i mikrobiologicheskih celej / L.P. Istranov, L.N. Bondareva // Lekarstva, sredstva, ekonomika, tehnologiya i perspektivy polucheniya. – 1969. – № 4. – S. 1–43.

3. Miller E. J. Biomedical and industrial application of collagen in Extracellular Matrix Biochemistry, New York : Elsevier, 1984. R. 41–81.

4. Bhaskar N., Modi V.K., Govindaraju K., Radha C., Lalitha R. G. Utilization of meat industry by products: protein hydrolysate from sheep visceral mass. Bioresource Technology. 2007. Vol. 98 (2). P. 388–394.

5. Nollet L. M. L., Toldra F. Handbook of Analysis of Edible Animal By-Products. Gent, Belgium: CRC Press. 2011. P. 3–11.

6. Prestes R.C. Colageno e seus derivados: caracteristicas e aplicagoes em produtos carneos. Revista Unopar Cientffica Ciencias Biologicas e da Saude. 2013. Vol. 15 (1). P. 65–74.

7. Mocan E., Tagadiuc O., Nacu V. Aspects of Collagen Isolation Procedure. Clinical Research Studies. 2011. № 2(320). P. 3–5.

8. Kuhareva L. V. Metod polucheniya kollagena iz telyachej shkury dlya tkanevoj inzhenerii i kletochnogo kultivirovaniya /L.V. Kuhareva, I.I. Shamolina, E.V. Polevaya // Citologiya. – 2010. – Tom 52. – № 7. – P. 597–602.

9. Kukhareva L. V., Shamolina I. I., Polevaya E. V. Metod polucheniya kollagena iz telyach'yey shkury dlya tkanevoy inzhenerii i kletochnogo kul'tivirovaniya. Tsitologiya. 2010. Tom 52. № 7. P. 597–602.

10. Savchuk O., Raksha N., Ostapchenko L., Mokrousova O., Andreyeva O. Extraction and Characterization of Collagen Obtained from Collagen-Containing Wastes of the Leather Industry. Solid State Phenomena. 2017. Vol. 267. pp. 172–176.

11. Prestes R.C. Colageno e seus derivados: caracteristicas e aplicagoes em produtos carneos. Revista Unopar Cientffica Ciencias Biologicas e da Saude. 2013. Vol. 15 (1). P. 65–74.

12. Almeida P. F., Araujo M. G. O., Santana, J. C. C. Collagen extraction from chicken feet for jelly production. Acta Scientiarum. Technology. 2012. Vol. 34(3). P. 345–351.

13. Liu D., Wei G., Li T., Hu J., Lu N., Regenstein, J. M., Zhou, P. Effects of alkaline pretreatments and acid extraction conditions on the acid-soluble collagen from grass carp (Ctenopharyngodon idella) skin. Food Chemistry. 2015. Vol.172. P. 836–843.

14. Wang L., Liang Q., Chen T., Wang Z., Xu J., Ma H. 2014. Characterization of collagen from the skin of Amur sturgeon (Acipenser schrenckii). Food Hydrocolloids. Vol. 38. P. 104–109.

15. Mocan E., Tagadiuc O., Nacu V. Aspects of Collagen Isolation Procedure. Clinical Research Studies. 2011. № 2(320). P. 3–5.

16. Golovteeva A.A. Laboratornyj praktikum po himii i tehnologii kozhi i meha : uchebnoe posobie dlya vuzov / Golovteeva A.A., Kucidi D.A., Sankin L.B. – 3-e izd, pererab i dop. – M. : Legprombytizdat, 1987. – 312 s.

Надійшла / Paper received : 26.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-275-280
УДК 620.22:677

О.В. ПАХОЛЮК
Луцький національний технічний університет
Г.О. ПУШКАР, І.С. ГАЛИК, Б.Д. СЕМАК
Львівський національний торгівельно-економічний університет

СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ НАНОНАУКИ, НАНОТЕХНОЛОГІЙ ТА РИНКУ НАНОПРОДУКЦІЇ В УКРАЇНІ ЗА ОСТАННІ ДЕСЯТИРІЧЧЯ

Як відомо, успішний розвиток нанонауки та нанотехнологій в Україні тісно пов'язаний із розвитком вітчизняного ринку нанопродукції. Тому проблема розвитку названих галузей, як і їх державної підтримки, регулювання та управління завжди повинні розглядатися, на нашу думку, комплексно та взаємопов'язано. У даній роботі ми обмежимося аналізом і узагальненням літературних даних, присвячених проблемам розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні в останні роки. Обґрунтуємо доцільність тестування вітчизняної нанопродуукції як нового товару на ринку України, а також розглянемо деякі концептуальні підходи, пов'язані із потребою розроблення теоретико-методологічних засад формування і розвитку вітчизняного ринку нанопродукції.

Ключові слова: нанонаука, нанотехнології, нанопродукція, товарний ринок, тестування, асортимент нанопродукції, якість, безпечність.

E.V. PAKHOLIUK
Lutsk National Technical University
G.O. PUSHKAR, I.S. GALYK, B.D. SEMAK
Lviv Trade and Economical University

STRATEGIC DIRECTIONS OF NANOSCIENCE, NANOTECHNOLOGIES AND NANO PRODUCTS MARKET DEVELOPMENT IN UKRAINE FOR THE LAST DECADES

As you know, the successful development of nanoscience and nanotechnology in Ukraine is closely linked with the development of the domestic market of nanoproducts. Therefore, the problem of development of these industries, as well as their state support, regulation and management should always be considered, in our opinion, comprehensively and interconnectedly. In this paper, we will limit ourselves to the analysis and generalization of literature data on the development of nanoscience, nanotechnology and the market of nanoproducts in Ukraine in recent years. We substantiate the feasibility of testing domestic nanoproducts as a new product on the Ukrainian market, as well as consider some conceptual approaches related to the need to develop theoretical and methodological foundations for the formation and development of the domestic nanoproduct market.

Keywords: nanoscience, nanotechnologies, nanoproducts, commodity market, testing, range of nanoproducts, quality, safety.

Постановка проблеми у загальному вигляді

На основі аналізу обраних літературних даних [1–20] вважаємо за доцільне:

- виявити пріоритетні напрями розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції України в останні десятиріччя;
- порівняти досягнутий рівень розвитку названих галузей із даними провідних країн в цих галузях;
- обґрунтувати доцільність збільшення державної підтримки розвитку цих нанотехнологій в Україні, за обсягами нанопродукції яких Україна ще відстає від зарубіжних країн (особливо США, Японії, Китаю);
- вважати доцільним поглиблення дослідження оптимальності асортименту, властивостей, рівня якості та безпечності нанопродукції вітчизняної легкої промисловості (особливо це стосується нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення), за обсягами виробництва якого Україна ще суттєво поступається зарубіжним країнам [17, 18];
- назріла невідкладна потреба відкриття при університетах сфери легкої промисловості та торгівлі України сучасних лабораторій, здатних забезпечити необхідні дослідження властивостей тієї нанопродукції, яка буде вироблятися на вітчизняних підприємствах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наведемо анотацію обраних нами літературних джерел [1–20] з метою вивчення та узагальнення даної проблеми, а також усунення існуючих недоліків розвитку вітчизняної нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції.

Автором роботи [1] розглянуті підсумки виконання інститутами НАН України державних програм розвитку нанонауки та нанотехнологій в Україні на 2010–2014 роки. Відзначається, що тільки за двома державними програмами було виконано 240 проектів з нанофізики, нанохімії та інших наук. Авторами розглядаються досягнення у розвитку нанонауки за різноманітною тематикою.

Авторами роботи [2] на основі аналізу літературних джерел сформульовані та обґрунтовані такі основні етапи розвитку нанотехнологій в Україні:

- основними продуцентами нанотехнологій в Україні є установи академічного сектора НАН України, оскільки саме вони нині виконують основну масу досліджень асортименту, властивостей, рівня якості та безпечності нанопродукції України;

- освітянські університети різних галузей промисловості, сільського господарства та медицини;
- промислові підприємства, підпорядковані різним міністерствам і установам та відомствам.

Обгунтована потреба державної підтримки розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні.

Авторами роботи [3] дано аналіз літературних джерел, присвячених розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні та окремих європейських країнах. Значна увага приділена розкриттю ролі державної підтримки для розвитку названих галузей. Узагальнена роль розвитку нанотехнологій в окремих країнах Європи у загальному розвитку їх економіки. Підкреслюється, що основну увагу слід приділити фундаментальним дослідженням нанотехнологій і нанопродукції. Особлива увага приділена вдосконаленню державної політики регулювання розвитку нанотехнологій, нанопродукції і ринку нанопродукції в Україні.

Автором роботи [4] розглянуто проблеми розвитку в Україні нанотехнологічного бізнесу. Дана оцінка розвитку бізнесу нанопродукції у провідних зарубіжних країнах. Виявлено та обґрунтовано пріоритетні напрями розвитку ринку нанопродукції в Україні.

Авторами роботи [5] розглянуті основні тенденції розвитку світового ринку нанотехнологій і нанопродукції. Вивчено основні напрямки розвитку даного ринку в Україні. Розглянуто проблеми фінансування розвитку нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні. Дана порівняльна характеристика вітчизняного і світового ринку нанопродукції.

Авторами роботи [6] розкривається роль розвитку нанотекстилю в Україні у загальному розвитку її економіки. Розглянуто основні чинники, які впливають на розвиток нанотехнологій в Україні та світі. Обґрунтована потреба державної підтримки розвитку нанонауки і нанотехнологій в Україні. Розглядається перспектива подальшого розвитку нанотехнологій в Україні.

Авторами роботи [7] розроблена та обґрунтована концепція розвитку нанотехнологій в Україні, яка розглядається як основа розвитку національної економіки України. Названа концепція сприяє задоволенню інтересів суспільства, держави й забезпеченню соціальної стабільності в країні. Авторська концепція передбачає формування необхідної платформи для розроблення унікальних нанотехнологій і наноматеріалів. Відзначається, що лідерами у сфері виробництва та застосування нанотехнологій та наноматеріалів у світі нині є США, Японія, Німеччина, Китай та інші. Відзначається, що майбутнє України за нанотехнологіями і наноматеріалами.

Авторами роботи [8] вивчена та обґрунтована необхідність державної підтримки та стимулювання розвитку нанотехнологій в Україні. Дано аналіз напрямків державної підтримки розвитку нанотехнологій та ринку вітчизняної нанопродукції. Обґрунтована необхідність мінімізації ризиків від використання нанотехнологій і нанопродукції різного цільового призначення.

Авторами роботи [9] дано аналіз сучасного ринку парафармацевтичної продукції з фотопротекторними властивостями, виготовлені на основі нанотехнологій. Відзначається, що вказаний ринок характеризується ще обмеженим асортиментом нанопродукції. Підтверджена доцільність розширення асортименту та збільшення обсягів виробництва названої нанопрдукції в Україні.

Авторами роботи [10] розглянуто європейський підхід і особливості розвитку світового ринку нанотехнологій. Дано аналіз літературних джерел, присвячених прогнозам розвитку нанотехнологій і нанопродукції в Європі і світі. Значна увага приділена питанням формування світового та європейського ринку нанопродукції. Обґрунтована доцільність використання зарубіжного досвіду розвитку ринку нанопродукції в Україні.

Автори роботи [11] наводять такі галузі виготовлення країнами світу нанопродукції за 2016 рік:

- текстильна промисловість – 12;
- спорт – 5;
- нафтова промисловість – 7;
- медицина – 7;
- побутова техніка – 6;
- харчування – 8;
- довкілля – 2;
- електроніка – 6;
- косметика – 9;
- будівництво – 12;
- автомобільна промисловість – 10;
- сільське господарство – 6;
- всього – 100%.

В названій роботі авторами також виявлені найбільш перспективні нанотехнології, продукція яких користується найбільшою популярністю в світі. Дано аналіз існуючих проблем у розвитку окремих нанотехнологій та ринку їх нанопродукції.

Авторами роботи [12] розглянуто стан розвитку нанотехнологій у різноманітних науково-дослідних установах України. Виявлені найбільш перспективні серед них. Основна увага приділена нанотехнологіям майбутнього, нанопродукція яких користується попитом на зарубіжних ринках. Значна увага приділена вивченню властивостей та оцінці рівня якості та безпечності найбільш перспективних видів нанопродукції окремих вітчизняних компаній.

Авторами роботи [13] розглянуто проблеми розвитку вітчизняної системи стандартизації у сфері нанопродукції. Виявлено ключові завдання, які вимагають невідкладного вирішення. Значна увага приділена оцінці токсичності нанопрепаратів різного цільового призначення і хімічної будови. Сформульовані перспективні напрямки розвитку сучасного асортименту нанопрепаратів медичного призначення.

Авторами роботи [14] визначено та обґрунтовано пріоритетні напрямки розвитку нанотехнологій в Україні. Обґрунтована доцільність державної підтримки їх розвитку. Названі пріоритетні напрямки досліджень в окремих зарубіжних країнах (США, Японії та інших).

Авторами роботи [15] розглянуто та обґрунтовано основні напрямки розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні в останні роки. Показана їх роль і значимість для розвитку вітчизняної економіки. Вивчені проблемні питання в названих галузях і показані шляхи їх вирішення. Названі нанотехнології, вимагають пріоритетного вирішення та державної підтримки.

Автором роботи [16] сформульовані та обґрунтовані основи нанотехнологій виробництва нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення. Розглянуто особливості виробництва нановолокон, а також нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення. Проведено аналіз асортименту та властивостей нанотекстилю різного цільового призначення. Дана характеристика текстильної нанопродукції XXI століття. Детально описано асортимент, властивості та сфери застосування нанотекстилю медичного призначення. Значна увага приділена проблемам безпеки виробництва та використання нанотекстилю. Сформульовані основні напрямки розвитку нанонауки про нанотекстиль, а також розвиток ринку текстильної нанопродукції.

Авторами роботи [17] досліджено та узагальнено основні напрямки формування асортименту, властивостей, рівня якості та безпечності екологобезпечного нанотекстилю одягового призначення. Обґрунтована доцільність застосування нанотехнологій для колористичного оформлення екотекстилю різного цільового призначення, а також заключного оброблення одягових текстильних матеріалів. Особливо це стосується використання нанотехнологій для суттєвого підвищення атмосферостійкості та біостійкості текстильних матеріалів різного цільового призначення, волокнистого складу та будови.

Авторами роботи [18] вивчено та узагальнено основні товарознавчі аспекти формування асортименту, властивостей, якості та безпечності нанотекстилю різного цільового призначення, волокнистого складу та будови. При цьому основна увага приділена оцінці безпеки використання нанотехнологій та нанопродукції.

Авторами роботи [19] розроблено та обґрунтовано теоретико-методологічні основи формування вітчизняного сировинного ринку екологобезпечної рослинної сировини текстильного призначення. Представляється за доцільне деякі теоретичні положення названих основ_використати для формування і розвитку вітчизняного ринку нанопродукції. Це стосується передусім формування концептуальних методів для формування і розвитку ринку нанопродукції в Україні, визначення кількісних характеристик функціонування даного ринку, а також аналізу кон'юнктури його розвитку.

Авторами роботи [20] вивчена можливість організації сучасного сегменту ринку нанотекстилю медичного призначення. Вивчено структуру видового асортименту нанотекстилю медичного призначення, його основні властивості та сфери найбільш раціонального використання. Розроблена та обґрунтована методика тестування медичного нанотекстилю як нового товару на вітчизняному ринку.

Метою роботи є обґрунтування доцільності тестування вітчизняної нанопродукції як нового товару на ринку України та сформулювати концептуальні основи розвитку даного ринку в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження

Як свідчить аналіз наведених літературних джерел [1–25] і узагальнення результатів власних досліджень, для формування в Україні окремого сегменту товарного ринку необхідно:

- вивчити та узагальнити реальні потреби споживачів даного ринку в конкретних видах нанопродукції;
- оцінити фінансові можливості споживачів нанопродукції на ближчі 2-3 роки;
- оцінити можливості імпорту аналогічної нанопродукції;
- узагальнити конкурентні переваги вітчизняної нанопродукції над імпортною;
- вивчити та узагальнити існуючі ризики від використання нанотехнологій та нанопродукції для населення та оточуючого середовища;
- на основі вивчення новизни та оригінальності асортименту окремих видів нанопродукції, конкретизувати методику тестування названої нанопродукції як нового товару на ринку України.

Розглядаючи концептуальні підходи до формування і розвитку вітчизняного ринку нанопродукції, акцентуємо основну увагу на вирішення наступних питань:

- подальше вдосконалення методики тестування вітчизняної нанопродукції як нового товару на ринку України;
- визначення кількісної характеристики результативності формування названого ринку;
- вивчення особливостей кон'юнктури розвитку даного ринку;
- оцінка основних напрямків і перспективи розвитку вітчизняного ринку нанопродукції.

Коротко сформулюємо та обґрунтуємо напрямки розвитку названих положень. Так, стосовно вдосконалення методики тестування нанопродукції як нового товару на вітчизняному ринку, то суть цього вдосконалення повинна включати:

- створення нової науково-обґрунтованої класифікації видового асортименту нанопродукції

різних способів виробництва та призначення;

- створення нової системи стандартизації основних термінів, положень і понять, що стосуються розвитку нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні;
- обґрунтування нової методики оцінки новизни окремих видів нанопродукції та її стандартизація.

Що стосується визначення кількісних характеристик результативності функціонування ринку нанопродукції, як і інших груп товарів, то воно вимагає обов'язкового застосування на даному ринку системи статистичної звітності обсягів реалізації конкретних видів нанопродукції. Саме за результатами статистичної звітності буде встановлено, яку частку на ринку нанопродукції займають наноматеріали і вироби вітчизняного і імпортного виробництва.

Крім визначення обсягів реалізації конкретних видів нанопродукції, встановлення частки імпортної нанопродукції, для даного ринку велике значення має встановлення місткості ринку для цієї нанопродукції, що дозволить оцінити перспективу розвитку цього ринку та його результативність.

Розглядаючи кон'юнктуру розвитку ринку нанопродукції України, основну увагу слід приділити її тісній ув'язці з питаннями вивчення та задоволення попиту на конкретні види даної нанопродукції, вивчення їх ключових властивостей, обсяги і стан ринку аналогічної імпортної нанопродукції. При цьому слід враховувати зовнішні та внутрішні чинники, які можуть впливати на розвиток даного ринку та його кон'юнктуру. У свою чергу названі чинники можуть мати сприятливий і несприятливий вплив на кон'юнктуру даного ринку. Так, наприклад, на кон'юнктуру ринку вітчизняної нанопродукції позитивно впливає ріст попиту на основні види цієї нанопродукції. І, навпаки, відсутність на даному ринку деяких видів нанопродукції, на які існує попит, негативно впливає на загальну характеристику кон'юнктури даного ринку.

Оцінку перспективи і основних напрямків розвитку ринку нанопродукції в Україні зроблено на прикладі текстильної нанопродукції, хоча ця галузь ще суттєво поступається як за обсягами виробництва, так і за широтою асортименту аналогічної нанопродукції в розвинутих зарубіжних країнах (особливо США, Японії, Китаї та Німеччині).

Спочатку обґрунтуємо доцільність і потребу подальшого розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку текстильної нанопродукції в Україні.

По-перше, на нашу думку, у сфері вітчизняної легкої промисловості існують необхідні сировинні, технологічні та кадрові ресурси не тільки для організації виробництва потрібної текстильної нанопродукції різного цільового призначення, але й усестороннього дослідження її асортименту, властивостей, рівня якості та безпечності.

По-друге, в університетах сфери вітчизняної легкої промисловості та торгівлі існують необхідні можливості для підготовки фахівців для використання нанотехнологій і збуту на ринках нанопродукції.

По-третє, розвиток нанонауки, нанотехнологій і ринку текстильної та іншої нанопродукції сприятиме підвищенні якості та конкурентоспроможності нанопродукції легкої промисловості України, яка нині ще поступається зарубіжним аналогам.

Все це вимагає значної державної підтримки для корінної перебудови роботи вітчизняної легкої промисловості, включаючи галузеву науку в даній галузі.

В даній роботі ми для прикладу зупинимося на деяких проблемах розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанотекстилю в Україні, оскільки, саме в цій галузі в багатьох економічно розвинутих країнах досягнуті найбільш суттєві результати.

Враховуючи зарубіжний досвід розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку текстильної нанопродукції, на нашу думку, зусилля науковців і фахівців даної галузі необхідно націлити на невідкладне вирішення наступних завдань:

- вивчення та обґрунтування реального попиту споживачів на конкретні види нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення;
- вивчення можливостей підприємств текстильної промисловості і галузевих та науково-дослідних установ займатися виробництвом і дослідженням властивостей нанотекстилю;
- обґрунтування економічної доцільності імпорту на ринок України тих видів нанотекстилю, які не можуть вироблятися в Україні;
- певні корективи слід внести в тематику і напрями наукових досліджень, які сьогодні виконуються в галузевих установах і установах легкої промисловості з обов'язковим врахуванням потреб ринку нанотекстилю.

На нашу думку, це стосується:

- створення науково-обґрунтованої класифікації нанотекстилю різного цільового призначення;
- організації державної та галузевої системи статистичної звітності обсягів виробництва та збуту конкретних видів нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення;
- розроблення серії державних стандартів, пов'язаних з формуванням асортименту, оцінкою властивостей, якості та безпечності нанотекстилю різного цільового призначення.

Окрім забезпечення розвитку ринку нанотекстилю названими видами інформації, існує потреба створення і обґрунтування теоретико-методологічних основ розвитку нанонауки, нанотехнологій та ринку текстильної нанопродукції в Україні, як це прийнято у багатьох економічно розвинутих країнах світу (США, Японії, Китаї та інших).

Вважаємо, що підняті в даній роботі проблеми розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції України обов'язково повинні бути включені у відповідні підручники із текстильного

товарознавства та матеріалознавства окремих груп товарів.

Висновки

На основі аналізу та узагальнення літературних джерел обґрунтована доцільність поглиблення розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні. Назріла потреба створення теоретико-методологічних основ розвитку названих галузей.

Стосовно проблеми формування та розвитку ринку вітчизняної нанопродукції, то першочергового розвитку вимагають: формулювання концептуальних підходів до розвитку виробництва та реалізації найбільш перспективних видів вітчизняної нанопродукції, а також кількісних характеристик результативності розвитку даного ринку (особливо його місткість).

Обґрунтування державної підтримки розвитку нанонауки, нанотехнології і ринку текстильної нанопродукції в Україні, оскільки наша країна ще суттєво відстає в названих галузях від економічно розвинутих країн світу (особливо США, Японії, Китаю).

Література

1. Наумовець А.Г. Стан та перспективи розвитку досліджень у галузі наносистем і наноматеріалів в Україні (стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 14 січня 2015 р.) / А.Г. Наумовець // Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 3. – С. 24–31.

2. Ткачова О.А. Науково-технологічний потенціал розвитку вітчизняної сфери нанотехнологій / О.А. Ткачова // Економіка і прогнозування. – 2015. – № 2. – С. 134–147.

3. Саліхова О.Б. Державна політика у сфері нанонауки та нанотехнологій в Україні з урахуванням орієнтирів ЄС / О.Б. Саліхова // Економіка і прогнозування. – 2014. – № 3. – С. 121–136.

4. Глухова Д.А. Розвиток нанотехнологічного бізнесу в Україні / Д.А. Глухова // Економіка та держава. – 2010. – № 12. – С. 58–59.

5. Бутко Б.О. Тенденції розвитку світового ринку нанотехнологій та нанопродукції / Б.О. Бутко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. – 2019. – Т. 30(69). – № 4(1). – С. 7–12.

6. Іванов С.М. Наноіндустрія як умова становлення інноваційного суспільства в Україні / С.М. Іванов, В.В. Карасюк // Право та інновації. – 2015. – № 3. – С. 28–38.

7. Бондар-Підгурська О.В. Нанотехнології як основа реалізації парадигми розвитку національної економіки / О.В. Бондар-Підгурська, А.О. Глєбова // Економіка і регіон. – 2017. – № 3. – С. 22–30.

8. Моісеєнко Ю.М. Державна підтримка та стимулювання нанотехнологій в Україні [Електронний ресурс] / Ю.М. Моісеєнко // Ефективна економіка. – 2014. – № 6. – Режим доступу : http://www.economy.nayka.com.ua.

9. Корж Ю.В. Оцінка сучасного ринку парафармацевтичної продукції з фотопротекторними властивостями, виготовленої на основі нанотехнологій / Ю.В. Корж // Запорож. мед. журн. – 2013. – № 3. – С. 101–104.

10. Березняк Н. В. Тенденції розвитку світового ринку нанотехнологій: європейський підхід / Н. Березняк, Т.К. Кваша, О.В. Фролова // Науково-технічна інформація. – 2009. – № 3. – С. 44–50.

11. Фесенко О.М. Проблеми та перспективи розвитку нанотехнологій в Україні та світі / О.М. Фесенко, С.В. Ковальчук, Р.А. Нищик // Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2017. – № 1. – С. 170–179.

12. Коваленко О. Нанотехнологічні відкриття та розробки в науково-дослідних установах України / О. Коваленко // Вища освіта України. – 2014. – № 1. – С. 47–53.

13. Демецька О.В. До проблеми стандартизації наноматеріалів / О.В. Демецька, О.Б. Леоненко, Т.Ю. Ткаченко, Н.С. Леоненко // Сучасні проблеми токсикології. – 2012. – № 3-4. – С. 101–103.

14. Матюшенко І.Ю. Проблема визначення пріоритетних напрямів розвитку нанотехнологій в рамках пріоритетів розвитку науки і техніки в Україні / І.Ю. Матюшенко//Проблеми економіки. – 2011. – № 2. – С.14–25.

15. Кирильчук О.В. Нанотехнології важливий напрямок інноваційного розвитку країни / О.В. Кирильчук, Н.В. Савчук // Матеріали доповідей XXVII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інноваційні пріоритети у розвитку науки», 18 лютого 2019 року, Вінниця, 2019. – С. 22–26.

16. Кричевский Г.Е. Нано-, био-, химические технологии и производство нового поколения волокон, текстиля и одежды / Г.Е. Кричевский. – М. : Изд-во «Известия», 2011. – 528 с.

17. Галик І.С. Проблеми формування та оцінювання екологічної безпечності текстилю : монографія / І.С. Галик, Б.Д. Семак. – Львів : Видавництво Львівської комерційної академії, 2014. – 488 с.

18. Галик І.С. Товарознавчі аспекти формування й оцінювання асортименту, якості та безпечності нанотекстилю / І.С. Галик, Б.Д. Семак // Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. – 2016. – Вип. 17. – С. 5–10.

19. Семак Б.Б. Теоретико-методологічні основи формування вітчизняного сировинного ринку екологічно безпечних товарів текстильної промисловості : монографія / Б.Б. Семак [за ред. М.А. Коваленка]. – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 232 с.

20. Семак Б.Б. Проблеми формування ринку медичного нанотекстилю в Україні / Б.Б. Семак // Економіка та держава. – 2015. – № 3. – С. 15–18.

21. Pakholiuk E.V. Research of the firmness of painting by the linen clothes fabrics to action the repeated

washing / Pakholiuk E.V., Semak B.D., Peredriy O.I., Golodyuk G.I. // Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology. – 2015. – №3 (357). – P. 78–81.

22. Пахолок О.В. Нові технології ефективного захисту текстилю від мікробіологічних пошкоджень / І.А. Мартиросян, Б.Д. Семак, О.З. Комаровська-Порохнявець та ін. // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2019. – № 4. – С. 621–636.

23. Irina Martirosyan Investigation of wear resistance of cotton-polyester fabric with antimicrobial treatment Advanced Manufacturing Processes / I. Martirosyan, O. Pakholiuk, B. Semak, V. Lubenets // Selected Papers from the Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – LNME, 2020. – P. 433–441. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_44 .

24. Peredriy O. Thermal properties of coatings based on full aluminosiloxane polymer / Peredriy O., Pakholiuk O., Martirosyan I. // Materials Research Express. 2020. 16 January. – URL: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c97 .

25. Мартиросян І.А. Вплив нової тіосульфонатної антимікробної обробки на стійкість текстильних матеріалів / Мартиросян І.А., Бочарова О.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Хмельницький. – 2020. – № 1. – С. 130–135.

References

1. Naumovets A.H. Stan ta perspektyvy rozvytku doslidzhen u haluzi nanosystem i nanomaterialiv v Ukraini (stenohrama naukovoi dopovidi na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy 14 sichnia 2015 r.) / A.H. Naumovets // Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. – 2015. – № 3. – S. 24–31.

2. Tkachova O.A. Naukovo-tekhnolohichnyi potentsial rozvytku vitchyznianoi sfery nanotekhnolohii / O.A. Tkachova // Ekonomika i prohnozuvannia. – 2015. – № 2. – S. 134–147.

3. Salikhova O.B. Derzhavna polityka u sferi nanonauky ta nanotekhnolohii v Ukraini z urakhuvanniam oriientyriv YeS / O.B. Salikhova // Ekonomika i prohnozuvannia. – 2014. – № 3. – S. 121–136.

4. Hlukhova D.A. Rozvytok nanotekhnolohichnoho biznesu v Ukraini / D.A. Hlukhova // Ekonomika ta derzhava. – 2010. – № 12. – S. 58–59.

5. Butko B.O. Tendentsii rozvytku svitovoho rynku nanotekhnolohii ta nanoproduktsii / B.O. Butko // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Ekonomika i upravlinnia. – 2019. – T. 30(69). – № 4(1). – S. 7–12.

6. Ivanov S.M. Nanoindustriia yak umova stanovlennia innovatsiinoho suspilstva v Ukraini / S.M. Ivanov, V.V. Karasiuk // Pravo ta innovatsii. – 2015. – № 3. – S. 28–38.

7. Bondar-Pidhurska O.V. Nanotekhnolohii yak osnova realizatsii paradyhmy rozvytku natsionalnoi ekonomiky / O.V. Bondar-Pidhurska, A.O. Hliebova // Ekonomika i rehion. – 2017. – № 3. – S. 22–30.

8. Moiseienko Yu.M. Derzhavna pidtrymka ta stymuliuvannia nanotekhnolohii v Ukraini [Elektronnyi resurs] / Yu.M. Moiseienko // Efektyvna ekonomika. – 2014. – № 6. – Rezhym dostupu : http://www.economy.nayka.com.ua.

9. Korzh Yu.V. Otsinka suchasnoho rynku parafarmatsevtychnoi produktsii z fotoprotektornymy vlastyvostiamy, vyhotovlenoi na osnovi nanotekhnolohii / Yu.V. Korzh // Zaporozh. med. zhurn. – 2013. – № 3. – S. 101–104.

10. Berezniak N. V. Tendentsii rozvytku svitovoho rynku nanotekhnolohii: yevropeiskyi pidkhid / N. Berezniak, T.K. Kvasha, O.V. Frolova // Naukovo-tekhnichna informatsiia. – 2009. – № 3. – S. 44–50.

11. Fesenko O.M. Problemy ta perspektyvy rozvytku nanotekhnolohii v Ukraini ta sviti / O.M. Fesenko, S.V. Kovalchuk, R.A. Nyshchyk // Marketynh i menedzhment innovatsii. – 2017. – № 1. – S. 170–179.

12. Kovalenko O. Nanotekhnolohichni vidkryttia ta rozrobky v naukovo-doslidnykh ustanovakh Ukrainy / O. Kovalenko // Vyshcha osvita Ukrainy. – 2014. – № 1. – S. 47–53.

13. Demetska O.V. Do problemy standartyzatsii nanomaterialiv / O.V. Demetska, O.B. Leonenko, T.Iu. Tkachenko, N.S. Leonenko // Suchasni problemy toksykolohii. – 2012. – № 3-4. – S. 101–103.

14. Matiushenko I.Iu. Problema vyznachennia priorytetnykh napriamiv rozvytku nanotekhnolohii v ramkakh priorytetiv rozvytku nauky i tekhniky v Ukraini / I.Iu. Matiushenko//Problemy ekonomiky. – 2011. – № 2. – C.14–25.

15. Kyrylchuk O.V. Nanotekhnolohii vazhlyvyi napriamok innovatsiinoho rozvytku krainy / O.V. Kyrylchuk, N.V. Savchuk // Materialy dopovidei KhKhVII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Innovatsiini priorytety u rozvytku nauky», 18 liutoho 2019 roku, Vinnytsia, 2019. – S. 22–26.

16. Krichevskij G.E. Nano-, bio-, himicheskie tehnologii i proizvodstvo novogo pokoleniya volokon, tekstilya i odezhdy / G.E. Krichevskij. – M. : Izd-vo «Izvestiya», 2011. – 528 s.

17. Halyk I.S. Problemy formuvannia ta otsiniuvannia ekolohichnoi bezpechnosti tekstyliu : monohrafiia / I.S. Halyk, B.D. Semak. – Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi komertsiinoi akademii, 2014. – 488 s.

18. Halyk I.S. Tovaroznavchi aspekty formuvannia y otsiniuvannia asortymentu, yakosti ta bezpechnosti nanotekstyliu / I.S. Halyk, B.D. Semak // Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2016. – Vyp. 17. – S. 5–10.

19. Semak B.B. Teoretyko-metodolohichni osnovy formuvannia vitchyznianoho syrovynnoho rynku ekolohichno bezpechnykh tovariv tekstylnoi promyslovosti : monohrafiia / B.B. Semak [za red. M.A. Kovalenka]. – Kherson : Hryn D. S., 2011. – 232 s.

20. Semak B.B. Problemy formuvannia rynku medychnoho nanotekstyliu v Ukraini / B.B. Semak // Ekonomika ta derzhava. – 2015. – № 3. – S. 15–18.

21. Pakholiuk E.V. Research of the firmness of painting by the linen clothes fabrics to action the repeated washing / Pakholiuk E.V., Semak B.D., Peredriy O.I., Golodyuk G.I. // Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology. – 2015. – №3 (357). – P. 78–81.

22. Pakholok O.V. Novi tekhnolohii efektyvnoho zakhystu tekstyliu vid mikrobiolohichnykh poshkodzhen / I.A. Martyrosian, B.D. Semak, O.Z. Komarovska-Porokhniavets ta in. // Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohii. – 2019. – № 4. – S. 621–636.

23. Irina Martirosyan Investigation of wear resistance of cotton-polyester fabric with antimicrobial treatment Advanced Manufacturing Processes / I. Martirosyan, O. Pakholiuk, B. Semak, V. Lubenets // Selected Papers from the Grabchenkos International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – LNME, 2020. – R. 433–441. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_44 .

24. Peredriy O. Thermal properties of coatings based on full aluminosiloxane polymer / Peredriy O., Pakholiuk O., Martirosyan I. // Materials Research Express. 2020. 16 January. – URL: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c97 .

25. Martyrosian I.A. Vplyv novoi tiosulfonatnoi antymikrobnoi obrobky na stiikist tekstylnykh materialiv / Martyrosian I.A., Bocharova O.V. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Khmelnytskyi. – 2020. – № 1. – S. 130–135.

Надійшла / Paper received : 16.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-281-286
УДК 004.49

В. П. ПАЮК, О. В. ГЕЙДАРОВА, В. Д. КОСЕНКОВ, О. С. САВЕНКО
Хмельницький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ З МЕТОЮ ВИЯВЛЕННЯ НЕЗАДОКУМЕНТОВАНИХ ЗАКЛАДОК ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ЛОКАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

В роботі здійснено дослідження стратегій з виявлення в програмному забезпеченні незадокументованих закладок, які можуть бути самостійними об'єктами або частиною певного зловмисного програмного забезпечення. Місцем дослідження вибрано локальні комп'ютерні мережі. Досліджено застосування методів багатофакторного аналізу з метою виявлення незадокументованих закладок програмного забезпечення. Це дозволило застосувати результати до незадокументованих закладок програмного забезпечення, які є частинами певного зловмисного програмного забезпечення, отримані для нього шляхом використання розподіленої багаторівневої системи виявлення. В економічних дослідженнях для співставлення об'єктів, що характеризуються великою кількістю ознак, застосовують таксономічний показник рівня розвитку. У розглядуваному випадку це може бути показник наявності незадокументованих закладок програмного забезпечення в локальній мережі. В основу покладений таксонометричний метод обробки статистичних даних спостережень, який використовується в економічних дослідженнях. В розглянутому випадку в якості об'єктів виступають комп'ютерні мережі, а ознаками можуть бути наявність модулів програмного забезпечення, які не відповідають призначенню процесу; наявність елементів операційних систем, які відкриті процесом, що не відповідають призначенню процесу; висока інтенсивність операцій введення-виведення зі сторони певного процесу тощо. Результат покращення результатів виявлення було підтверджено проведеним протягом тривалого часу експерименту з виявлення незадокументованих закладок програмного забезпечення.

Ключові слова: *незадокументовані закладки, програмне забезпечення, багатофакторний аналіз, зловмисне програмне забезпечення, локальна комп'ютерна мережа.*

V. P. PAIUK , O. V. HEIDAROVA, V. D. KOSENKOV, O. S. SAVENKO
Khmelnytskyi National University

APPLICATION OF MULTIFACTOR ANALYSIS FOR THE PURPOSE OF DETECTING IMPLANT IN THE SOFTWARE IN LOCAL COMPUTER NETWORKS

The paper investigates strategies for detecting undocumented bookmarks in software, which may be independent objects or part of certain malicious software. Local computer networks were chosen as the place of research. The difficulty of detecting such a secretly included in the software functional object, which under certain conditions is able to provide unauthorized software influence, due to the possibility of its absence for a long time. Such an object can be part of a software package that performs tasks, replace completely certain parts of the software package, replace a certain required program. As a rule, such undocumented software bookmarks allow to store the software functions declared by the manufacturer and are realized by a part of functions which are a part of a software complex. *The application of multifactor analysis methods to detect undocumented software bookmarks has been studied. This allowed the results to be applied to undocumented software bookmarks that are part of certain malware obtained for it by using a distributed multi-level detection system. In economic research, a taxonomic indicator of the level of development is used to compare objects that are characterized by a large number of features. In this case, it may be an indicator of the presence of undocumented software bookmarks on the local network. It is based on the taxonomic method of processing statistical data of observations, which is used in economic research. In this case, the objects are computer networks, and the signs may be: the presence of software modules that do not meet the purpose of the process; the presence of elements of operating systems that are open to the process, which do not meet the purpose of the process; high intensity of input-output operations from a certain process, etc. The result of improved detection results was confirmed by a long-term experiment to detect undocumented software bookmarks.*

Keywords: *implant, software, multifactor analysis, malicious software, local computer network.*

Вступ. Постановка задачі

Застосування сучасних інформаційних технологій в різних сферах зростає. Це породжує активність зловмисників з метою отримати вигоду за рахунок недоліків в їх захисті. Актуальними для отримання вигоди з погляду зловмисників є організації та підприємства, в яких функціонують інформаційні технології. Одним із способів доступу зловмисників до інформаційних систем підприємств є використання незадокументованих можливостей в програмному та апаратному забезпеченні персональних комп'ютерів і периферійному обладнанні, які дозволяють здійснювати прихований несанкціонований доступ до ресурсів системи, як правило, за допомогою локальної мережі. Основне призначення незадокументованих програмних закладок – забезпечити несанкціонований доступ до конфіденційної інформації. Для виявлення таких дій і несанкціонованої активності в комп'ютерних мережах використовується багато засобів і методів [1], але можуть бути застосовні приманки [2–13].

В якості об'єкту дослідження розглядатимемо незадокументовані закладки програмного забезпечення [14], яке використовується в локальних комп'ютерних мережах підприємств (організацій). Виявлення такого таємно внесеного в програмне забезпечення функціонального об'єкту, який за певних умов здатний забезпечити несанкціонований програмний вплив [15], пов'язане з можливістю відсутності його прояву протягом тривалого часу. Такий об'єкт може бути частиною програмного комплексу, який виконує поставлені завдання, замінювати повністю певні частини програмного комплексу, замінювати

певну потрібну програму. Як правило, такі незадокументовані закладки програмного забезпечення дозволяють зберігати заявлені виробником функції програмного забезпечення і реалізуються частиною функцій, які входять до програмного комплексу.

Одним із завдань, які потребують вирішення, є розробка математичного забезпечення для методів виявлення незадокументованих закладок програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах.

Основна частина

В роботі [1] наведено підхід до проведення багатофакторного аналізу з метою виявлення не задокументованих закладок програмного забезпечення (НЗПЗ) в локальній комп'ютерній мережі. В основу покладений аксонометричний метод обробки статистичних даних спостережень, який використовується в економічних дослідженнях [16, 17]. В нашому випадку в якості об'єктів виступають комп'ютерні мережі, а ознаками можуть бути [18]: наявність модулів програмного забезпечення (ПЗ), які не відповідають призначенню процесу; наявність елементів операційних систем, які відкриті процесом, що не відповідають призначенню процесу; висока інтенсивність операцій введення – виведення зі сторони певного процесу тощо (наведено 11 ознак, хоча їх кількість може бути більшою).

Основою для досліджень є матриця спостережень X:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{1k} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ik} & \cdots & x_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{\omega 1} & x_{\omega 2} & \cdots & x_{\omega k} & \cdots & x_{\omega n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де x_{ik} - кількість проявів k-тої ознаки у i-того об'єкту за період спостереження; n - кількість ознак; ω - кількість об'єктів.

Наведено, як проводиться ізотонічне та ізоморфічне (структурне) упорядкування об'єктів, метод Чекановського для дослідження підмножин на однорідність.

В економічних дослідженнях для співставлення об'єктів, що характеризуються великою кількістю ознак, застосовують таксономічний показник рівня розвитку [16]. У нашому випадку це може бути показник наявності НЗПЗ в локальній мережі. І це буде подальшим розвитком досліджень, які викладені в роботі [1].

Першим етапом є стандартизація ознак в матриці (1) і її перетворення в матрицю Z.

Найпростішим прийомом є ділення кожного значення елементу стовпця на суму елементів стовпця. Але більш поглиблений аналіз може передбачати введення ієрархії ознак за допомогою коефіцієнтів ієрархії, які дозволяють розрізняти ознаки за їх значущістю. Для цього можна застосовувати метод аналізу ієрархій [17–19]:

- експертом будується квадратна матриця $n \times n$ попарних порівнянь ознак, яка має властивість зворотної симетрії $a_{ji} = 1/a_{ij}$;
- розраховуються власні вектори пріоритетів, для чого перемножуються усі елементи рядка і береться корінь n-ного ступеня з результату, а потім отримане число ділиться на суму таких чисел стовпця і отримуються оцінки вектора пріоритетів $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$;
- матриця $n \times n$ перемножується на стовпчик вектора пріоритетів і отримується стовпець з $(y_1, y_2, \cdots, y_n)$, який показує ступінь важливості кожної ознаки.

Тоді до переходу від матриці X до матриці Z треба результати спостережень в матриці (1) помножити на коефіцієнти відповідно $y_к$.

В роботі [16] пропонується перехід до матриці Z у такій послідовності:

$$Z_{ik} = \frac{X_{ik} - \overline{X}_k}{S_k}, \quad (2)$$

де

$$\overline{X}_k = \frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{\omega} X_{ik}, \quad (3)$$

$$S_k = \left[\frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{\omega} \left(X_{ik} - \overline{X}_k \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

$k = 1, 2, \cdots, n$; X_{ik} - значення ознаки k для одиниці i; $\overline{X}_k$ - середньоарифметичне значення ознаки k; S_k - стандартне відхилення ознаки k; Z_{ik} – стандартизоване значення ознаки k для одиниці i.

Далі формується так званий еталон розвитку, який представляє точку P_0 з координатами

$Z_{01}, Z_{02}, \ldots, Z_{0k}, \ldots, Z_{0n}$. Ці координати представляють еталони або допустимі значення ознак.

Тоді відстань між точками-одиницями матриці Z та точкою P_0 визначається за формулою:

$$C_{i0} = \left[\sum_{k=1}^{n} \left(Z_{ik} - Z_{0k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (i = 1, \ldots, \omega). \tag{5}$$

За цими відстанями розраховується показник наявності НЗПЗ:

$$d_i^* = \frac{C_{i0}}{C_0}, \tag{6}$$

де

$$C_0 = \overline{C}_0 + 2S_0, \tag{7}$$

$$\overline{C}_0 = \frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{\omega} C_{i0}, \tag{8}$$

$$S_0 = \left[\frac{1}{\omega} \sum_{k=1}^{n} \left(C_{i0} - Z_{0k} \right)^2 \right]. ^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

Показник d_i^* може знаходитися в межах 0….1. Чим ближче цей показник до нуля, тим більша ймовірність відсутності НЗПЗ у об'єкту.

Показник d_i^* служить для статичної характеристики множини об'єктів. Для більш глибокого аналізу необхідно розглянути динамічну характеристику одного об'єкту, а потім – множини об'єктів.

Тоді за результатами спостережень за декілька періодів часу формується матриця спостережень X для одного об'єкту:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \ldots & x_{1k} & \ldots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ldots & x_{2k} & \ldots & x_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ x_{i1} & x_{i2} & \ldots & x_{ik} & \ldots & x_{in} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ x_{t1} & x_{t2} & \ldots & x_{tk} & \ldots & x_{tn} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

де x_{ik} - значення ознаки k в період i.

Далі, як було показано вище, відбувається процес стандартизації (матриця Z), будується еталон P_0.

Таксономічний показник d_i^* визначається формулою (6), де

$$C_{i0} = \left[\sum_{k=1}^{n} \left(Z_{ik} - Z_{0k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \left(i = 1, \ldots, t \right), \tag{11}$$

$$C_0 = \overline{C}_0 + 2S_0, \tag{12}$$

$$\overline{C}_0 = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{t} C_{i0}, \tag{13}$$

$$S_0 = \left[\frac{1}{t} \sum_{k=1}^{t} \left(C_{i0} - C_0 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{14}$$

Отже, тепер показник d_i^* описує динаміку змін наборів, що досліджуються, однак для одного об'єкту.

Тепер можна перейти до динамічної характеристики множини об'єктів. Якщо позначити матрицю спостережень об'єкту j символом X_j, то сукупна матриця для ω об'єктів залишиться у вигляді блочної матриці:

$$X_0 = \left[X_1, X_2, \ldots, X_j, \ldots, X_\omega \right]. \quad (15)$$

Враховуючи, що в мережі всі об'єкти однотипні – це комп'ютери, то еталон P_0 може залишитися з попереднього аналізу.

Узагальнений показник d_i^* визначається формулою (6), де:

$$C_{i0} = \left[\sum_{i=1}^{\omega} \sum_{k=1}^{n} \left(Z_{ik} - Z_{0k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (i = 1, \ldots, t). \quad (16)$$

C_0, $\overline{C}_0$, S_0 визначаються формулами (12), (13), (14).

Тут n – кількість ознак; ω - кількість об'єктів; Z_{ik} - стандартизоване значення ознаки k в період t.

Обчислений показник d_i^* описує процес з динамічною характеристикою усіх об'єктів. Але згідно [16] тут не враховуються напрями змін окремих складових на загальну величину показника. Тому, в роботі [16] пропонується заміна відстані C_{i0} на $C_{i0,j}$:

$$C_{i0,j} = \left[\sum_{k=1}^{n} \left(Z_{ik} - Z_{0k,j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

де $i = 1, 2, \ldots, t$: $j = 1, 2, \ldots, \omega$; $Z_{0k,j}$ - координати еталону розвитку об'єкту j.

Тоді залежність (16) для квадрату відстані для сукупного показника та квадратом відстані для індивідуальних показників можна записати у вигляді:

$$C_{i0}^2 = \sum_{j=1}^{\omega} C_{i0,j}^2 . \quad (18)$$

З урахуванням $C_{i0} = C_0 \cdot d_i^*$ та $C_{i0,j} = C_{0,j} \cdot d_{i,j}$ залежність між сукупним та індивідуальними показниками залишиться:

$$d_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{\omega} C_{0,j}^2 \cdot d_{i,j}^*}{C_0^2}. \quad (19)$$

Отримана формула дозволяє оцінити вплив індивідуальних таксономічних показників об'єктів $d_{i,j}^*$ на загальний таксономічний показник множини об`єктів d_i^*. Тут, як і раніше, цей показник знаходиться в інтервалі (0,1).

Результат показника відносимо до одного із п'яти інтервалів, які дозволяють оцінити рівень можливої присутності НЗПЗ.

Експериментальні дослідження

Проведення експериментів було здійснено з використанням розподіленої багаторівневої системи виявлення ЗПЗ [20]. НЗПЗ було розроблено як складову кожної з типових бот-мереж. Тоді, метою експериментів була перевірка застосування методу виявлення бот-мереж, роботи класифікатору в структурі розподіленої системи та визначення залежності відсотку виявлених вузлів бот-мережі від їх представлення векторами, в складі яких були НЗПЗ. В результаті проведення експерименту отримано віднесення до потрібного підкласу та класу отриманих на основі моніторингу векторів з точністю до 66% для класифікатору без введених векторів 28 штучно згенерованих бот-мереж та 88% для класифікатору, в який попередньо було додано вектори шляхом здійснення його навчання, зберігаючи в ньому шаблони попередніх наповнень. Відсоток ознак, які були використані РБС для виявлення бот-мереж і пов'язані з проявами НЗПЗ, становить приблизно 27% від загальної кількості виявлених. Інтенсивність проявів від НЗПЗ суттєво нижче від типових проявів бот-мереж. Таким чином, НЗПЗ в складі бот-мереж можуть бути виявлені розподіленими багаторівневими системами [20] і напрям таких досліджень є перспективним.

Висновки

Незадокументовані закладки програмного забезпечення, яке використовується в локальних комп'ютерних мережах, можуть завдати значної шкоди користувачам персональних комп'ютерів, а особливо підприємствам, які експлуатують комп'ютерні мережі та використовують спеціалізоване програмне забезпечення.

Запропонований підхід до виявлення незадокументованих закладок програмного забезпечення дозволяє оцінити ступінь їх присутності. Це дало можливість за рахунок застосування багатофакторного аналізу з метою виявлення незадокументованих закладок програмного забезпечення в локальній комп'ютерній мережі покращити ефективність виявлення НЗПЗ на 4%.

Напрямком подальших досліджень є розробка методів виявлення НЗПЗ для застосування їх в розподіленій системі корпоративної мережі.

Література

1. Савенко О. С. Дослідження методів антивірусного діагностування комп'ютерних мереж / О. С. Савенко, С. М. Лисенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 2, т. 2. – С. 120–126.

2. Data Collection and Data Analysis in Honeypots and Honeynets. Pavol Sokol, Patrik Pekarčík, Tomáš Bajtoš. URL: http://spi.unob.cz/papers/2015/2015-19.pdf [Access 18.04.2020].

3. Study of Internet Threats and Attach Methods Using Honeypots and Honeynets. Tomas Sochor, Matej Zuzcak - Springer International Publishing Switzerland 2014, A. Kwiecie´n, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): CN 2014, CCIS 431, pp. 118–127, 2014.

4. Sochor Tomas. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection. Tomas Sochor, Matey Zuzcak – Springer International Publishing Switzerland 2015, P. Gaj at al. (Eds.): CN 2015, CCIS 522, pp. 69–81, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19419-6 7.

5. A Survey on Honeypot Software and Data Analysis. Marcin Nawrocki, Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, Christian Keil, Jochen Schönfelder. arXiv:1608.06249v1 [cs.CR] 22 Aug 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1608.06249 [Access 26.03.2020]

6. Composite Hybrid Techniques for Defending Against Targeted Attacks. S. Sidiroglou, A.D. Keromytis. Part of the Advanced in Information Security book series (ADIS, volume 27), 2007, 213-229 pp.

7. Shadow Honeypots. K.G. Anagnostakis, S. Sidiroglou, M. Polychronakis, A.D. Keromytis, P. Markatos. International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 9, September 2010, 16 p.

8. POSTER: Dragging Attackers to Honeypots for Effective Analysis of Cyber Threats. Martin Husak, Jan Vykopal. URL: https://is.muni.cz/repo/1188174/POSTER-Dragging_Attackers_to_Honeypots_for_Effective_Analysis_of_Cyber_Threats.pdf [Access 30.05.2020]

9. Effective Proactive and Reactive Defense Strategies against Malicious Attacks in a Virtualized Honeynet. Frank Yeong-Sung Lin, Yu-Shun Wang, Ming-Yang Huang. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 518213, 11 pages. URL: https://www.hindawi.com/journals/jam/2013/518213/ [Access 10.04.2020]

10. Automatic Identification of Honeypot Server Using Machine Learning Techniques. Cheng Huang, Jiaxuan Han, Xing Zhang, Jiayong Liu. Hindawi, Security and Communication Networks Volume 2019, Article ID 2627608, 8 pages.

11. Survey of Attach Projection, Prediction, and Forecasting in Cyber Security. Martin Husak, Jana Komarkova, Elias Bou-Harb, Pavel Celeda. IEEE Communication Survays & Tutorials – September 2018, URL: https://www.researchgate.net/publication/327449459_Survey_of_Attack_Projection_Prediction_and_Forecasting_in_Cyber_Security [Access 12.05.2020]

12. Honeypots and Routers: Collecting Internet Attacks. Mohssen Mohammed, Habib-ur Rehman – CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2016. 197p.

13. Honeypots. A new Paradigm to Information Security. R.C. Joshi, Anjali Sardana - Science Publishers, P.O. Box 699, Enfield, NH 03748, USA, 2011. 323 p.

14. Савенко О.С. Моделі незадокументованих закладок програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах / О. С. Савенко, В. П. Паюк, Б. О. Савенко, А.С. Каштальян // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2019. – № 2. – С. 84–90.

15. Савенко О.С. Дослідження та аналіз блокування процесів в комп'ютерній системі / О.С. Савенко, Ю.П. Кльоц, С.В. Мостовий // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 3, Том 1. – С. 248–251.

16. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях: методы таксономии и факторного анализа / Плюта В. ; пер. с пол. – М. : Статистика,1980. – 151 с., ил.

17. Игумнов Б.Н. Кибернетические основы построения экономических систем для предприятий : уч. пособие / Игумнов Б.Н., Завгородняя Т.П. – Хмельницкий : ТУП, 2000. – 344 с.

18. Саати Г. Аналитическое планирование. Организация систем / Саати Г., Керно К. ; пер.с англ. – М. : Радио и свіязь, 1991. – 224 с.

19. Андрейчиков А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике : уч. пособие / Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 368 с.

20. Савенко О.С. Оцінки ефективності та достовірності розподілених систем виявлення зловмисного програмного забезпечення в комп'ютерних системах локальних мережах / О.С. Савенко, А.О. Нічепорук, В.П. Паюк // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2019. – № 36. – С. 134–139.

References

1. Savenko O.S. Research of methods of antiviral diagnostics of computer networks / O.S. Savenko, S.M. Lysenko // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2007. – Issue 2, vol. 2. – P. 120–126.

2. Data Collection and Data Analysis in Honeypots and Honeynets. Pavol Sokol, Patrik Pekarčík, Tomáš Bajtoš. URL: http://spi.unob.cz/papers/2015/2015-19.pdf [Access 18.04.2020].

3. Study of Internet Threats and Attach Methods Using Honeypots and Honeynets. Tomas Sochor, Matej Zuzcak - Springer International Publishing Switzerland 2014, A. Kwiecie´n, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): CN 2014, CCIS 431, pp. 118–127, 2014.

4. Sochor Tomas. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection. Tomas Sochor, Matey Zuzcak – Springer International Publishing Switzerland 2015, P. Gaj at al. (Eds.): CN 2015, CCIS 522, pp. 69–81, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19419-6 7.

5. A Survey on Honeypot Software and Data Analysis. Marcin Nawrocki, Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, Christian Keil, Jochen Schönfelder. arXiv:1608.06249v1 [cs.CR] 22 Aug 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1608.06249 [Access 26.03.2020]

6. Composite Hybrid Techniques for Defending Against Targeted Attacks. S. Sidiroglou, A.D. Keromytis. Part of the Advanced in Information Security book series (ADIS, volume 27), 2007, 213-229 pp.

7. Shadow Honeypots. K.G. Anagnostakis, S. Sidiroglou, M. Polychronakis, A.D. Keromytis, P. Markatos. International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 9, September 2010, 16 p.

8. POSTER: Dragging Attackers to Honeypots for Effective Analysis of Cyber Threats. Martin Husak, Jan Vykopal. URL: https://is.muni.cz/repo/1188174/POSTER-Dragging_Attackers_to_Honeypots_for_Effective_Analysis_of_Cyber_Threats.pdf [Access 30.05.2020]

9. Effective Proactive and Reactive Defense Strategies against Malicious Attacks in a Virtualized Honeynet. Frank Yeong-Sung Lin, Yu-Shun Wang, Ming-Yang Huang. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 518213, 11 pages. URL: https://www.hindawi.com/journals/jam/2013/518213/ [Access 10.04.2020]

10. Automatic Identification of Honeypot Server Using Machine Learning Techniques. Cheng Huang, Jiaxuan Han, Xing Zhang, Jiayong Liu. Hindawi, Security and Communication Networks Volume 2019, Article ID 2627608, 8 pages.

11. Survey of Attach Projection, Prediction, and Forecasting in Cyber Security. Martin Husak, Jana Komarkova, Elias Bou-Harb, Pavel Celeda. IEEE Communication Survays & Tutorials – September 2018, URL: https://www.researchgate.net/publication/327449459_Survey_of_Attack_Projection_Prediction_and_Forecasting_in_Cyber_Security [Access 12.05.2020]

12. Honeypots and Routers: Collecting Internet Attacks. Mohssen Mohammed, Habib-ur Rehman – CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2016. 197p.

13. Honeypots. A new Paradigm to Information Security. R.C. Joshi, Anjali Sardana - Science Publishers, P.O. Box 699, Enfield, NH 03748, USA, 2011. 323 p.

14. Savenko O.S., Payuk V.P., Savenko B.O., Kashtalyan A.S. Models of undocumented software bookmarks in local computer networks. Measuring and computing equipment in technological processes. 2019. № 2. P. 84–90.

15. Savenko O.S., Klots Y.P, Mostoviy S.V. Research and analysis of process blocking in a computer system // Herald of Khmelnytskyi National University. 2007. Issue 3, Volume 1. – P. 248-251.

16. Pluta V. Comparative multidimensional analysis in economic research: methods of taxonomy and factor analysis / Per. s pol. - M.: Statistics, 1980. – 151 p.

17. Igumnov B.N., Zavgorodnyaya T.P. Cybernetic bases of construction of economic systems for the enterprises. Khmelnitsky: TUP, 2000. 344p.

18. Saati G., Kerno K. Analytical planning. Organization of systems: Translated from English. M.: Radio and communication, 1991. 224 p.

19. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. Analysis, synthesis, planning solutions in economics. M.: Finance and Statistics, 2001. 368 p.

20. Savenko O.S., Nicheporuk A.O., Paiuk V.P. Estimates of efficiency and reliability of distributed malware detection systems in computer systems of local networks // Computer-integrated technologies: education, science, production, № 36, 2019. P. 134–139.

Надійшла / Paper received : 16.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-287-291
УДК 620.168.16

М.С. СТЕЧИШИН, Ю.М. БІЛИК, Н.С. МАШОВЕЦЬ, В.С. КУРСКОЙ
Хмельницький національний університет

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ ВІД ОБ'ЄМНОГО ВМІСТУ І РОЗМІРІВ ЧАСТИНОК ЗМІЦНЮЮЧОЇ ФАЗИ

Досліджено кавітаційно-ерозійну зносостійкість сформованих композиційних електролітичних покриттів (КЕП) з частинками карбіду кремнію (SiC) різних геометричних розмірів в нейтральних, кислих та лужних середовищах. Показано, що КЕП з частинками $SiC_{нано}$ і SiC_5 у середньому в 6 разів підвищують зносостійкість сталі 45 нормалізованої в жорсткій воді, у 11 разів в 3-відсотковому розчині NaCl і більше ніж в 16 разів в кислому середовищі. Дослідження також показали, що зі зростанням корозійної активності середовища ефективність дії КЕП зростає, а збільшення розмірів частинок SiC зменшує кавітаційно-ерозійну зносостійкість покриття. Для частинок SiC_{50} і SiC_{28} максимальні значення кавітаційно-ерозійної зносостійкості в усіх досліджених середовищах досягаються при їх вмісті в нікелевій матриці C_α=22…25%.

***Ключові слова**: КЕП, кавітаційно-ерозійна зносостійкість, електроліз, нікелева матриця, карбід кремнію.*

M.S. STECHYSHYN, YU.M. BILYK, N.S. MASHOVETS, V.S. KURSKOY
Khmelnytskyi National University

DEPENDENCE OF WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE ELECTROLYTIC COATINGS ON THE VOLUME CONTENT AND SIZE OF PARTICLES OF THE STRENGTHENING PHASE

The aim of the work is to study the cavitation-erosion wear resistance of formed composite electrolytic coatings (CEC) with silicon carbide (SiC) particles of different geometric sizes and different volume content in the nickel matrix in neutral, acidic and alkaline media. It is shown that CEC with SiC_{nano} and SiC_5 particles on average 6 times increase the wear resistance of steel 45 normalized in hard water, 11 times in 3% NaCl solution and more than 16 times in acidic environment. Studies have also shown that with increasing corrosion activity of the environment, the efficiency of CEC increases, and increasing the size of SiC particles reduces the cavitation and erosion resistance of the coating. It was found that increasing the volume content of SiC_{nano} and SiC_5 particles in the Nickel matrix increases the cavitation-erosion resistance of CEC in all media. The effectiveness of the effect of SiC_{nano} and SiC_5 particles on the wear resistance of CEC in 3% NaCl solution is manifested at their volume content of the matrix C_α≥10%. For SiC_{50} and SiC_{28} particles, the maximum values of cavitation-erosion wear resistance in all studied media are achieved when their content in the nickel matrix C_α=22…25%. In the future, it is necessary to investigate the influence of the stress-strain state of the hardened surface, the distance between SiC particles on the physicochemical and tribological characteristics of CEC.

Keywords: CEC, cavitation-erosion wear resistance, electrolysis, nickel matrix, silicon carbide.

Постановка проблеми. Поєднання різних механізмів зміцнення матриці крупними і дрібними частинками наповнювача привело до створення градієнтних багатошарових КЕП з «прямим» і «оберненим» градієнтами структури по товщині шару покриття. Застосування КЕП градієнтного типу підвищує їх зносостійкість від 4 до 7 разів, що пояснюється сприятливим розподілом внутрішніх напружень, особливо при застосуванні КЕП з «прямим» градієнтом їх будови.

Враховуючи, що кавітаційно-ерозійна зносостійкість зумовлена двома факторами: корозійним і механічним, необхідно дослідити не лише фізико-механічні характеристики, але і зміну їх електрохімічних характеристик та корозійну стійкість залежно від технологічних параметрів електролізу, природи і геометричних розмірів частинок наповнювача, його вмісту в матриці і т.д.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізико-механічні характеристики КЕП на основі нікелевої матриці з наповнювачем, що містить карбід кремнію (SiC) в значній мірі визначаються не лише геометричними розмірами частинок SiC, але і їх об'ємним вмістом в нікелевій матриці. Так, в роботі [1] вказується, що є пропорційна залежність між твердістю частинок, їх кількістю в КЕП з нікелевою матрицею і міцністю. Максимальне значення міцності досягається при оптимальному вмісті частинок в покритті, перевищення якого різко знижує фізико-механічні характеристики КЕП. Для частинок SiC різного розміру їх об'ємний вміст 20…25% в нікелі забезпечує найвищу міцність. Аналогічних робіт щодо кавітаційно-ерозійної зносостійкості нами не виявлено.

Головна мета даної роботи полягає в дослідження кавітаційно-ерозійної зносостійкості сформованих композиційних електролітичних покриттів (КЕП) з частинками карбіду кремнію (SiC) різних геометричних розмірів і різного об'ємного вмісту в нікелевій матриці в нейтральних, кислих та лужних середовищах.

Методика проведення досліджень. Аналіз конструкцій лабораторних установок для формування КЕП показав, що здебільшого використовуються установки розроблені і описані в роботах [1–3]. Основний їх недолік – відсутність контролю режимів електрохімічного осаджування частинок наповнювача матриці.

В установці ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України влаштований пристрій, в якому умови кристалізації задаються за допомогою модуляції частоти і амплітуди імпульсів постійного струму, які подаються на робочий електрод за допомогою імпульсного генератора [4].

В основу установки для формування КЕП створеної на кафедрі машинознавства ХНУ поставлено

завдання контролю і регулювання швидкості осаджування електропровідних і седиментації неелектропровідних частинок порошків наповнювача для підвищення ступеню наповнення матриці, особливо наночастинками в поєднанні з порошками більш грубих фракцій при формуванні КЕП градієнтного типу. Це завдання досягнуто завдяки тому, що в процесі електролізу швидкість доставки частинок наповнювача контролюється і регулюється зміною напруженості електричного поля приелектродного шару зразка (деталі) за допомогою потенціостату, а однорідність суспензії і стабілізація умов електролізу досягається встановленням двох мішалок та двох охолоджувальних різнонаправлених змійовикових контурів [5].

Взаємодія макрорівня від лопатевої і мікрорівня перемішування від пропелерної мішалок гарантує рівномірність розподілу навіть наночастинок в об'ємі електроліту на протязі всього часу електролізу. Необхідну частоту обертання мішалок знаходили відповідно до густини і динамічної в'язкості розчину, що залежить від об'ємного вмісту частинок та їх фракційності за умови забезпечення турбулентного режиму перемішування [6].

Формування КЕП з розмірами частинок наповнювача більше ніж 10 мкм здійснювалася на горизонтальному катоді при імпульсному режимі перемішування електроліту магнітною мішалкою. При розмірах частинок менше 10 мкм (50 нм та М5 мкм) формування покриття проводилася на вертикальному катоді з неперервним перемішуванням електроліту магнітною мішалкою.

Кавітаційно-ерозійна зносостійкість КЕП досліджувалася на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ). Установка складалася з ультразвукового генератора УЗДН-А потужністю 150 Вт, частотою коливань 22 кГц і амплітудою коливань концентратора 5…85 мкм.

Кінетику втрат маси при кавітаційно-ерозійному зношуванні знаходили шляхом зважування зразків з покриттями до і після кавітації на аналітичних вагах ВЛР-200.

Для більш детального аналізу механізмів кавітаційно-ерозійного зношування, впливу структури, фазових складових покриття в багатьох роботах наголошується на оцінці зношування не за втратами маси, а за швидкістю руйнування поверхневих шарів, що особливо ефективно при оцінці зносостійкості багатошарових покриттів [3, 7]. Тому швидкість (інтенсивність) зношування покриттів оцінювали за формулою (1):

$$\upsilon_p = \frac{\Delta G_I - \Delta G_{I-1}}{S\Delta\tau}, \quad (1)$$

де $\Delta G_I, \Delta G_{I-1}$ – втрати маси зразка, мг; S – площа поверхні зразка, см^2 (в наших дослідах S=1 см^2); τ – час кавітації.

В роботі досліджуються КЕП на нікелевій основі з наповнювачем SiC різних фракцій від розміру 100/80 мкм до наночастинок розміром менше 50 нм. Таким чином, в роботі використано порошки SiC з розмірами менше 50 нм – наночастинки; М5; 28/20; 50/40; 100/80 мкм. Відповідно до розмірів частинок SiC в подальшому прийнято такі позначення: Ni-SiC$_{нано}$; Ni-SiC$_5$; Ni-SiC$_{28}$; Ni-SiC$_{50}$; Ni-SiC$_{100}$.

Для формування КЕП на нікелевій матриці здебільшого використовують сульфатні або сульфатхлористі електроліти нікелювання [1, 2]. Недоліком таких електролітів є невисока швидкість осаджування нікелю: 20…40 мкм/год при густині струму 0,2…0,5 кА/м^2. Збільшення густини струму приводить лише до погіршення якості покриття.

В даній роботі використовувався хлористий електроліт нікелювання, що дозволяє підвищити катодну густину струму, збільшити швидкість осаджування нікелю [8].

До переваг обраного електроліту нікелювання відноситься стабільність величини pH протягом усього часу електролізу, що виключає вплив зміни кислотності на об'ємний вміст частинок наповнювача в КЕП.

В електроліт додатково вводили ПАР-лаурилсульфат натрію в кількості 0,01…0,02 г/л, який за даними [3] сприяє включенню частинок SiC в покриття та покращує умови нарощування нікелевої матриці.

До карбідів кремнію в якості наповнювача додавали також порошки аморфного бору розміром біля 1 мкм, що пояснюється можливістю взаємодії бору та нікелю при наступній термічній обробці покриття і отримання нових його структур (тверді розчини, евтектика, дисперсійно-тверді сплави).

Порошки SiC та B вводили в електроліт безпосередньо перед формуванням КЕП в кількості від 10 до 110 кг/м^3 залежно від розміщення катоду, режимів електролізу і необхідного об'ємного вмісту частинок наповнювача в нікелевій матриці.

Зразки для нанесення КЕП виготовляли зі сталі 45.

Експлуатаційні, в тому числі трибологічні і особливо кавітаційно-ерозійні характеристики зносостійкості КЕП залежать від міцності зчеплення (адгезії) покриття з основою. Сила зчеплення КЕП зі стальною основою (сталь 45) залежать від ступеня очистки поверхні від окислів та інших хімічних з'єднань. Тому перед нанесенням КЕП зразки знежирювалися віденським вапном та піддавали анодній обробці протягом 3…4 хв у 20-відсотковому розчині сірчаної кислоти при густині струму 2 кА/м^2

Виклад основного матеріалу. Формування КЕП з Ni-SiC$_{нано}$ і Ni-SiC$_5$, а також з включеннями аморфного бору проводили на вертикальному катоді з неперервним перемішуванням суспензії на розробленій нами установці [2]. Формування КЕП з частинками SiC$_{28}$, SiC$_{50}$, SiC$_{100}$ із додаванням порошків аморфного бору здійснювали на горизонтальному катоді. Зміна вмісту частинок в матриці регулювалася зміною відношення τ_u/τ_c, та зміною концентрації частинок SiC і B в електроліті.

Кількість частинок бору і кремнію в покритті визначали методами хімічного і металографічного аналізів.

Об'ємний вміст частинок наповнювача залежить від геометричних розмірів частинок. Сформовані нами КЕПи містили максимально 15 % об. для $SiC_{нано}$ і 16…18 % об. для SiC_5.

Випробування на кавітаційно-ерозійну зносостійкість протягом 1 год показали, що із збільшенням вмісту частинок SiC в нікелевій матриці втрати маси зразків зменшуються в жорсткій воді, розчині хлориду натрію і в кислому модельному середовищі. Особливо різке падіння втрат маси маємо при випробуваннях в 3%-му розчині хлориду натрію. Ефективність зміцнюючої дії частинок SiC проявляється при їх об'ємному вмісті починаючи від 5% і зростає при її збільшенні. Внаслідок того, що покриття з вмістом частинок $SiC_{нано}$, SiC_5 і аморфного бору в нікелевій матриці з їх вмістом більше 20% технологічно досягнути важко, в подальших дослідженнях використовували КЕП з об'ємним вмістом таких частинок 14…18%.

Результати кавітаційної зносостійкості приведені на рис.1 включають результати випробувань КЕП, що містили 5…18% частинок Ni-SiC_5. Отже, із збільшенням об'ємної концентрації частинок SiC_5 в матриці, кавітаційно-ерозійна зносостійкість КЕП підвищується (зменшуються втрати маси) в жорсткій воді, 3-відсотковому розчині NaCl і в кислому модельному середовищі. Внаслідок технологічних труднощів в подальших дослідженнях використовувалися КЕП з об'ємним вмістом частинок $SiC_{нано}$ і SiC_5 в середньому $15 \pm 1.5\%$.

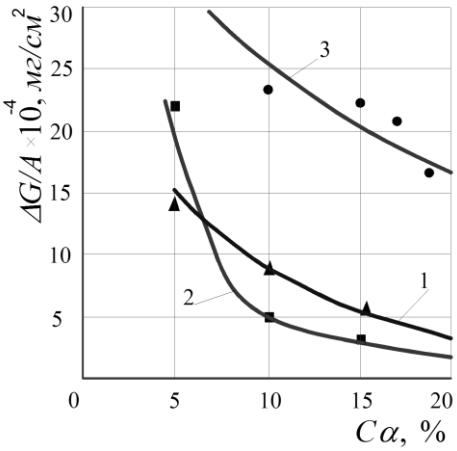


Рис. 1. Кінетика втрат маси КЕП складу Ni-SiC_5 залежно від об'ємного вмісту частинок в Ni: 1 – жорстка вода; 2 – 3% розчин NaCl і 3 – кисле середовище

Формування КЕП з частинками SiC більших геометричних розмірів дозволяє зміною технологічних параметрів електролізу (рис.1), зміною відношення τ_u/τ_c, зміною концентрації частинок SiC і B в електроліті та густини катодного струму i_k дозволяє в більших межах змінювати їх об'ємний вміст в нікелевій матриці. Таким чином, були отримані покриття з вмістом частинок SiC_{50} C_α, %: 7,5; 15,6; 18,7; 28,6 та 43,2. Випробування на кавітаційно-ерозійну стійкість сформованих КЕП проводили на протязі 1 год в нейтральних і кислих модельних середовищах. Отримані результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Кавітатаційно-ерозійна зносостійкість КЕП Ni+SiC_{50} залежно від об'ємного вмісту частинок наповнювача

Середовище	Об'ємний вміст частинок наповнювача α,%				
	7,5	15,6	18,7	28,6	43,2
	Втрати маси, $\Delta G / A \cdot 10^{-4}$ мг/см^{2}год				
Жорстка вода	10,8	13,4	8,6	8,7	19,2
3-відсотковий розчин NaCl	17	6,7	5,2	5,8	20,8
кисле	18	13,4	11,4	12,4	24,1
лужне	14	8,1	4,1	4,4	22,8

Аналіз результатів табл. 1 показує, що є певний оптимальний вміст частинок SiC_{50} в матриці при якому досягається максимальна кавітаційно-ерозійна зносостійкість КЕП, що особливо добре проявляється на кривих втрат маси при кавітації (рис. 2). Мінімальні втрати маси, а отже і найбільша зносостійкість досягається в інтервалі об'ємного вмісту частинок від 22 до 27 % в усіх досліджених середовищах. При подальшому збільшенні об'ємного вмісту частинок SiC_{50} зносостійкість падає. Для частинок SiC_{100} в нікелевій матриці максимальна зносостійкість при терті відповідає їх об'ємному вмісту 21% [3] і практично не змінюється до вмісту частинок 27%.

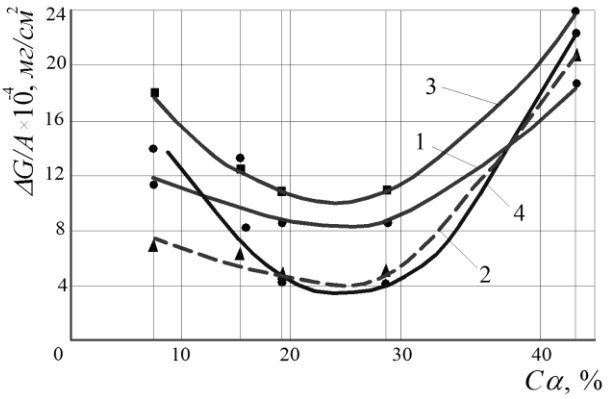


Рис. 2. Кінетика втрат маси КЕП складу Ni-SiC_{50} залежно від об'ємного вмісту частинок : 1 – жорстка вода; 2 – 3% розчин розчин NaCl; 3 – кисле середовище і 4 – лужне середовище

Максимальна зносостійкість КЕП в жорсткій воді з частинками SiC_{28} досягається при їх вмісті в матриці біля 25% (рис. 3). Тому більші втрати маси в жорсткій воді порівняно з втратами маси в 3-відсотковому розчині NaCl можна пояснити далеко неоптимальним вмістом частинок SiC_{28} (C_α≈15,6 %) в КЕП при необхідному їх вмісті C_α≈25% (рис. 3).

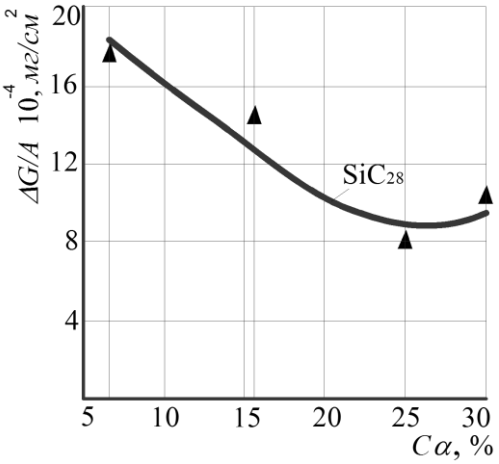


Рис. 3. Кінетика втрат маси КЕП складу Ni-SiC_{28} залежно від об'ємного вмісту частинок в жорсткій воді

Згідно з [4] при формуванні нікелевої матриці з хлористого електроліту при відсутності в ньому співосаджуваних частинок, електрокристалізація проходить шляхом нарощування одночасно по усій поверхні окремих кристалів лінзовидної і пірамідальної форми, середня величина яких біля основи сягає 5…6 мкм. Експериментальні дані свідчать також про те, що розміри кристалів нікелю зменшуються залежно від природи, розмірів і концентрації частинок наповнювача в електроліті.

Процес осаджування нікелю, частинок аморфного бору і карбіду кремнію проходить шляхом утворення великої кількості напівсферичних агрегатів, що супроводжується подрібненням добре огранених пірамідальних і лускатих кристалів нікелю до розмірів від 1,5 до 3 мкм [4, 5]. Частинки бору і кремнію дислокуються, в основному, по границям між крупними кристалітами. Отже, при мікроударному навантаженні частинки SiC і B блокують поширення деформацій на сусідні кристали і сприймають частину ударних навантажень кавітаційних хвиль. При цьому, частинки більших геометричних розмірів в більшій мірі сприймають ударні навантаження, а менш крупні, розташовані на границях кристалів нікелю, блокують поля деформацій і рух дислокацій через границю кристалів.

Висновки. Досліджено кавітаційно-ерозійну зносостійкість сформованих КЕП з частинками SiC різних геометричних розмірів в нейтральних, кислих та лужних середовищах. Показано, що КЕП з частинками $SiC_{нано}$ і SiC_5 в середньому в 6 разів підвищують зносостійкість сталі 45 нормалізованої в жорсткій воді, в 11 разів в 3-відсотковому розчині NaCl і більше ніж в 16 разів в кислому середовищі. Дослідження також показали, що із зростанням корозійної активності середовища ефективність дії КЕП зростає, а збільшення розмірів частинок SiC зменшує кавітаційно-ерозійну зносостійкість покриття.

Встановлено, що збільшення об'ємного вмісту частинок $SiC_{нано}$ і SiC_5 в нікелевій матриці підвищує кавітаційно-ерозійну стійкість КЕП у всіх середовищах. Ефективність впливу цих частинок на зносостійкість КЕП в 3-відсотковому розчині NaCl проявляється при їх об'ємному вмісті матриці C_α≥10%.

Для частинок SiC_{50} і SiC_{28} максимальні значення кавітаційно-ерозійної зносостійкості в усіх досліджених середовищах досягаються при їх вмісті в нікелевій матриці C_α=22…25%.

Література

1. Антропов Л.И. Композиционные электрохимические покрытия и материалы / Л.И. Антропов, Ю.Н. Лебединский. – К. : Техніка, 1986. – 200 с.

2. Износостойкие диффузионно-легированные композиционные покрытия / [М.В. Лучка, М.В. Кіндрачук, П.И. Мельник и др.]. – К. : Техніка. 1993. – 143 с.

3. Триботехнічні характеристики термооброблених композиційнихелектролітичних покриттів з наповнювачами евтектичного сплаву / А. О. Корнієнко, І. А. Гуменюк, С. В. Федорчук, Ю. В. Пищенко. // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – № 4 (77). – С. 63–68.

4. Пат. 30731 Україна, МПК C25D 17/00; C25D 15/00. Електролізер для нанесення композиційних електролітичних покриттів / Лучка М.В., Дерев'янко О.В., Корнієнко А.О. та ін. – U 200712357 ; заявл. 07.11.2007 ; опубл. 11.03.2008, Бюл № 16.

5. Пат. 55154 Україна, МПК C25D11/00; C25D15/00. Гальванічна установка для нанесення композиційних електролітичних покриттів / Стечишин М.С., Білик Ю.М. – U201005565 ; заявл.07.05.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.

6. Стечишин М.С. Установка для нанесення композиційних електролітичних покриттів / М.С. Стечишин, Ю.М. Білик, А.В. Мартинюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 2. Т. 2. – С. 196–199.

7. Білик Ю.М. Підвищення кавітаційно-ерозійної зносостійкості вуглецевих конструкційних сталей композиційними електролітичними покриттями : автореф. дис. … канд. техн. наук / Ю.М. Білик. – Хмельницький, 2014. – 20 с.

8. Яворський В.Т. Електрохімічне нанесення металевих, конверсійних та композиційних покриттів / В.Т. Яворський, О.І. Кунтій, М.С. Хома. – Львів : Львівська політехніка, 2000. – 216 с.

References

1. Antropov L.I. Kompozicionnye elektrohimicheskie pokrytiya i materialy / L.I. Antropov, Yu.N. Lebedinskij. – K. : Tehnika, 1986. –200 s.

2. Iznosostojkie diffuzionno-legirovannye kompozicionnye pokrytiya / [M.V. Luchka, M.V. Kindrachuk, P.I. Melnik i dr.]. – K. : Tehnika. 1993. – 143 s.

3. Trybotekhnichni kharakterystyky termoobroblenykh kompozytsiinykhelektrolitychnykh pokryttiv z napovniuvachamy evtektychnoho splavu / A. O. Korniienko, I. A. Humeniuk, S. V. Fedorchuk, Yu. V. Pyshchenko. // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2017. – № 4 (77). – S. 63–68.

4. Pat. 30731 Ukraina, MPK S25D 17/00; C25D 15/00. Elektrolizer dlia nanesennia kompozytsiinykh elektrolitychnykh pokryttiv / Luchka M.V., Derevianko O.V., Korniienko A.O. ta in. – U 200712357 ; zaiavl. 07.11.2007 ; opubl. 11.03.2008, Biul № 16.

5. Pat. 55154 Ukraina, MPK C25D11/00; C25D15/00. Halvanichna ustanovka dlia nanesennia kompozytsiinykh elektrolitychnykh pokryttiv / Stechyshyn M.S., Bilyk Yu.M. – U201005565 ; zaiavl.07.05.2010 ; opubl. 10.12.2010, Biul. № 23.

6. Stechishin M.S. Ustanovka dlya nanesennya kompozicijnih elektrolitichnih pokrittiv / M.S. Stechishin, Yu.M. Bilik, A.V. Martinyuk // Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu. – 2008. – № 2. T. 2. – S. 196–199.

7. Bilyk Yu.M. Pidvyshchennia kavitatsiino-eroziinoi znosostiikosti vuhletsevykh konstruktsiinykh stalei kompozytsiinymy elektrolitychnymy pokryttiamy : avtoref. dys. … kand. tekhn. nauk / Yu.M. Bilyk. – Khmelnytskyi, 2014. – 20 s.

8. Iavorskyi V.T. Elektrokhimichne nanesennia metalevykh, konversiinykh ta kompozytsiinykh pokryttiv / V.T. Yavorskyi, O.I. Kuntii, M.S. Khoma. – Lviv : Lvivska politekhnika, 2000. – 216 s.

Надійшла / Paper received : 05.11.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-292-296
УДК 621.81

О.Г. ТИМОЩУК
Хмельницький національний університет

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ДЛЯ В'ЯЗКІСНОГО РЕЖИМУ ПЕРЕТІКАННЯ ГАЗУ

На основі теорії стохастичних процесів розроблено метод розрахунку герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень для в'язкісного режиму перетікання газу. Результатом є створення інженерного методу розрахунку герметичності (тривалості натікання газу) в беззмащувальних циліндро-поршневих металополімерних ущільненнях, а також оцінка точності розробленого методу для в'язкісного режиму плину газу через циліндро-поршневі ущільнення. В статті розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металевою) поверхнею. Досліджена залежність зведеного натікання газу від комплексу умов контактування на основі теорії стохастичних полів. Виконана оцінка похибки, яка виникає при заміні точної формули розрахунку зведеного натікання наближеною формулою. Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою зведеного натікання, різняться не більше, ніж на 6 відсотків. Теоретично обґрунтовані і розроблені точні методи розрахунку герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень для в'язкісного режиму плину газу є основою для практичних розрахунків герметичності ущільнень беззмащувальних компресорів. Натікання при перехідному режимі плину газу можна знайти на підставі значень, розрахованих для в'язкісного та молекулярного режимів плину газу через циліндро-поршневі ущільнення.

Ключові слова: контакт; теорія стохастичних полів; номінальний контактний тиск; питома площа шорсткої поверхні контакту; герметичність циліндро-поршневих ущільнень; тривалість плину газу; в'язкісний та перехідний режими перетікання газу.

O.G. TYMOSHCHUK
Khmelnytskyi National University

EVALUATION OF ACCURACY OF THE METHOD OF CALCULATIONS OF GAS TIGHTNESS OF CYLINDER-PISTON SEALS FOR VISCOUS GAS FLOW REGIME

Based on the theory of stochastic processes, a method for calculating the tightness of non-lubricating cylinder-piston seals for the viscous regime of gas flow has been developed. The result is the development of an engineering method for calculating the tightness (duration of gas leakage) in non-greasy cylinder-piston metal-polymer seals, as well as assessing the accuracy of the developed method for the viscous regime of gas flow through cylinder-piston seals. The article considers the elastic contact of a strongly anisotropic rough surface (polymer surface) with a smooth (metal) surface. The dependence of the consolidated gas flow on the complex of contact conditions on the basis of the theory of stochastic fields is investigated. An estimate of the error that occurs when replacing the exact formula for calculating the consolidated inflow with an approximate formula. The values calculated according to the exact and calculated formula of the consolidated inflow differ by no more than 6 percent. Theoretically substantiated and developed accurate methods for calculating the tightness of non-lubricating cylinder-piston seals for the viscous regime of gas flow are the basis for practical calculations of the tightness of the seals of non-lubricating compressors. Leakage during the transient gas flow regime can be found on the basis of the values calculated for the viscosity and molecular regimes of the gas flow through the cylinder-piston seals.

Keywords: contact; stochastic field theory; nominal contact pressure; specific area of the rough contact surface; tightness of cylinder-piston seals; duration of gas flow; viscous and transient gas flow regimes.

Формулювання цілі статті

Необхідно виконати аналіз і оцінку точності розробленого методу розрахунку герметичності (тривалості натікання газу) беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень для в'язкісного та перехідного режимів перетікання (плину) газу в циліндро-поршневому ущільненні.

Результати досліджень

Розглянемо розрахункову схему торцевого ущільнення (рис. 1) з метою подальшого перетворення математичних залежностей для випадку циліндро-поршневих ущільнень.

При в'язкісному режимі плину газу тиск в ущільненні (рис. 1) розподілений за законом [1]:

$$p^2 = {p_1}^2 + \frac{{p_2}^2 - {p_1}^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r/r_1) \ . \qquad (1)$$

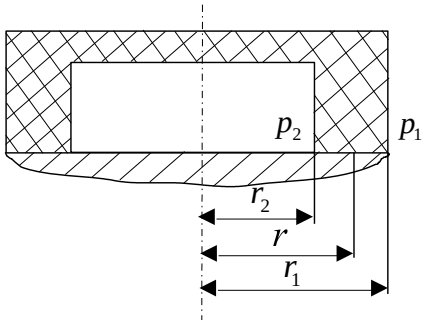


Рис. 1. Розрахункова схема торцевого ущільнення

Швидкість плину газу в ущільненні визначається за законом Дарсі [2]:

$$V_F = -\frac{K_П}{\eta_B}\frac{dp^2}{dr} \ , \tag{2}$$

де $K_П$ – коефіцієнт проникливості;

η_B – динамічна в'язкість газу.

Продиференціювавши (1), отримаємо:

$$\frac{dp^2}{dr} = \frac{{p_2}^2-{p_1}^2}{r\ln(r_2/r_1)} \ . \tag{3}$$

Підставимо (3) в (2):

$$V_F = \frac{K_П}{\eta_B}\frac{{p_2}^2-{p_1}^2}{r\ln(r_1/r_2)} \ . \tag{4}$$

Сумарний потік газу за одиницю часу визначимо за формулою:

$$Q_B = H_S\int_0^{2\pi} rV_F d\theta \ , \tag{5}$$

де H_S – середня висота зазору.

Підставивши (4) в (5), отримаємо:

$$Q_B = \frac{2\pi K_П H_S}{\eta_B}\frac{{p_2}^2-{p_1}^2}{\ln(r_1/r_2)} \ . \tag{6}$$

Позначимо:

$$r_1 = r_2 + b \ ,$$

де b – ширина ущільнюючої поверхні.

При $r_2 \to \infty$ формула (6) буде описувати плин газу в смузі шириною b, і тоді отримаємо випадок циліндро-поршневого ущільнення. При цьому маємо:

$$\ln(r_1/r_2) \to b/r_2 \ ;$$

$$Q_B \to \frac{2\pi r_2 K_П H_S}{b\eta_B}({p_2}^2 - {p_1}^2) \ .$$

Якщо врахувати, що $2\pi r_2$ – довжина кола, що омивається газом, то величина натікань в межах одиничної довжини складає:

$$Q_B^{'} = \frac{K_П H_S}{b\eta_B}({p_2}^2 - {p_1}^2) \ .$$

Величина натікань в межах довжини поперечного профілю C, що омивається газом, складе:

$$Q_B = CQ_B^{'} \ .$$

Якщо позначити діаметр ущільнюючої поверхні d і розглядати натікання вздовж всього кола діаметром d, то, оскільки в цьому випадку $C = \pi d$, маємо:

$$Q_B = \frac{\pi d K_П H_S}{b\eta_B}({p_2}^2 - {p_1}^2) \ . \tag{7}$$

Коефіцієнт проникливості $K_П$ можна визначити наступним чином [4]:

$$K_П = \frac{П^3}{5\,{S_0}^2} \ , \tag{8}$$

де $П$ – пористість;

S_0 – питома поверхня шорсткого шару, що омивається газом.

Величини $П$ та S_0 можна розрахувати, якщо відомі питомий міжконтактний об'єм V, середня висота зазору H_S та питома площа поверхні стику, що омивається середовищем S_K:

$$П = V/H_S \ ; \tag{9}$$

$$S_0 = S_K/H_S \ ; \tag{10}$$

$$S_K = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)(1+S) \ , \tag{11}$$

Питома площа шорсткої, сильно анізотропної поверхні

$$S = \frac{1}{2\sqrt{2\pi m_2}}\exp\left(\frac{1}{4m_2}\right)\left[K_0\left(\frac{1}{4m_2}\right) + K_1\left(\frac{1}{4m_2}\right)\right], \tag{12}$$

$$m_2 = 2\pi^3\left(\frac{Ra}{S_m}\right)^2 \ ,$$

де m_2 – спектральний момент другого порядку.

Середня висота зазору [6]

$$H_S = m_0^{1/2}\left\{u + \left[\left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2}\exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right]^{-1}\right\}, \tag{13}$$

$$m_0 = \frac{\pi}{2}Ra^2 \ ,$$

де m_0 – спектральний момент нульового порядку;

u – ефективний рівень деформації.

Підставивши (9, 10) в (8), отримаємо:

$$K_П = \frac{V^3}{5\,{S_K}^2 H_S} \ ,$$

або:

$$K_{\Pi}H_S = \frac{V^3}{5\,{S_K}^2}\ . \tag{14}$$

Підстановка (14) в (7) дає наступний результат:

$$Q_B = \frac{\pi d}{5b\eta_B}\frac{V^3}{{S_K}^2}({p_2}^2 - {p_1}^2)\ . \tag{15}$$

Необхідно використати формулу міжконтактного об'єму [6]:

$$V = \frac{{m_0}^{1/2}}{2}\left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) + \text{uerfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right]. \tag{16}$$

Підставивши (11, 16) в (15), отримаємо:

$$Q_B = \frac{{m_0}^{3/2}d}{b\eta_B(1+S)^2}({p_2}^2 - {p_1}^2)F_B(u)\ , \tag{17}$$

де

$$F_B(u) = \frac{\pi}{5}\frac{[F_V(u)]^3}{[F_S(u)]^2}\ ; \tag{18}$$

$$F_V(u) = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) + \text{uerfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right]\ ; \tag{19}$$

$$F_S(u) = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\ . \tag{20}$$

З (17) видно, що натікання при в'язкісному плині газу Q_B прямо пропорційне кубові середньоарифметичного відхилення Ra точок профілю, діаметрові ущільнюючої поверхні d, різниці квадратів тиску газу на вході і на виході ущільнюючого елементу. Натікання Q_B обернено пропорційне динамічній в'язкості газу η_B та ширині ущільнюючої поверхні b. Із збільшенням питомої площі шорсткої поверхні та S та комплексу умов контактування K натікання зменшується. Висновок про пропорційність натікання при в'язкісному плині газу кубові середньоарифметичного відхилення точок профілю відповідає результатам експериментальних досліджень інших авторів [5].

Назвемо зведеним натіканням при в'язкісному плині газу наступну величину:

$$\tilde{Q}_B = Q_B\frac{b\eta_B(1+S)^2}{{m_0}^{3/2}d({p_2}^2 - {p_1}^2)}\ . \tag{21}$$

Очевидно, що $\tilde{Q}_B = F_B(u)$. На підставі (18 - 20) за допомогою програми Strom_S [6], написаної з використанням програмного продукту Mathcad Professional, розрахований зв'язок зведеного натікання $\tilde{Q}_B$ з комплексом умов контактування K. Отримані результати представлені на рис. 2.

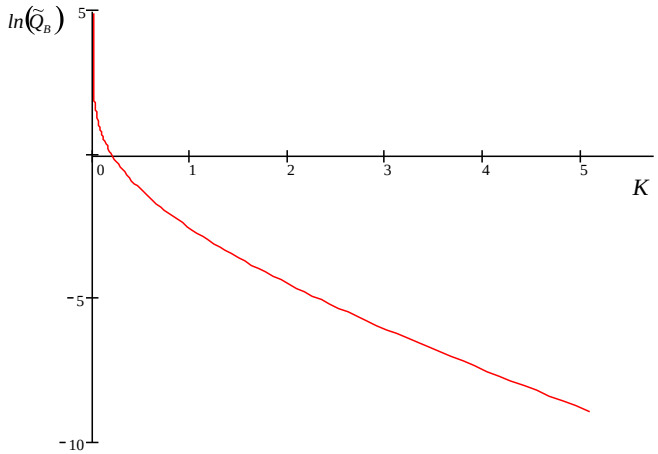


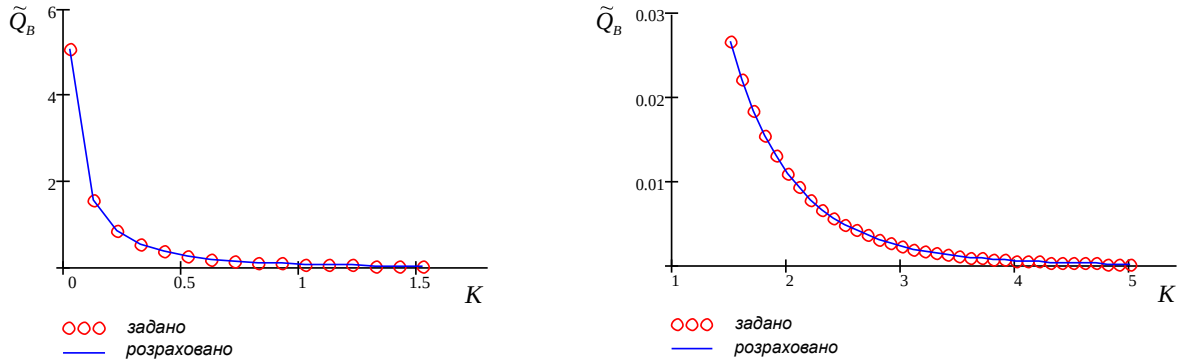
Рис. 2. Залежність зведеного натікання $\tilde{Q}_B$ від комплексу умов контактування K

Залежність, представлена на рис. 2, була апроксимована формулою:

$$\tilde{Q}_B = \begin{cases} 0{,}055\ ln^{2{,}467}\left(1 + \frac{2{,}106}{K^{1{,}497}}\right), (K < 1{,}5); \\ 8{,}813\cdot 10^{-5}\ ln^{4{,}452}\left(1 + \frac{94{,}247}{K^{2{,}37}}\right), (K \geq 1{,}5) \end{cases}. \tag{22}$$

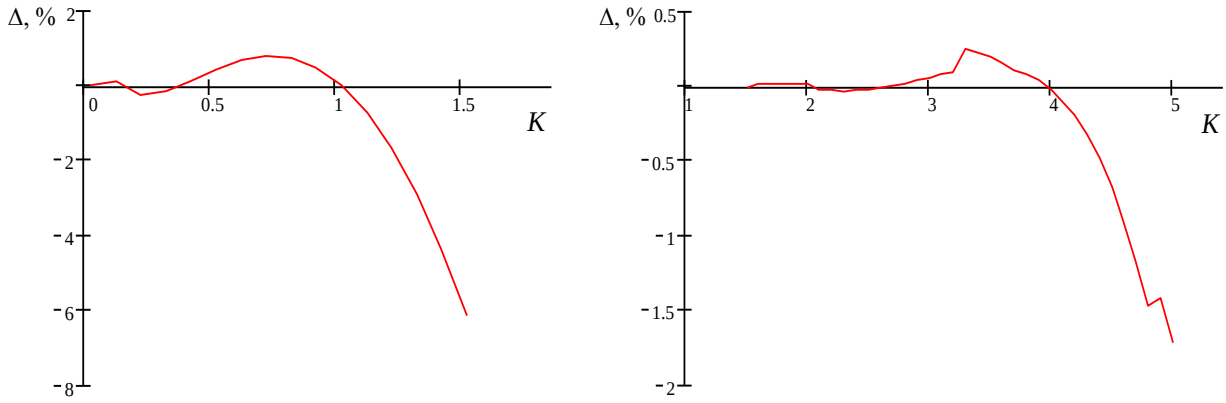
Формулу (22) отримано в результаті розрахунків за програмами Appr_SS_1, Appr_SS_2 [6], написаними з використанням програмного продукту Mathcad Professional. Вона якісно описує поведінку зведеного натікання $\tilde{Q}_B$ при зміні номінального навантаження, оскільки з неї випливає, що:

$$\lim_{\sigma_n \to 0}\tilde{Q}_B = \infty;\ \lim_{\sigma_n \to \infty}\tilde{Q}_B = 0.$$



а) K<1,5 **б) K≥1,5**

Рис. 3. Співставлення заданих та розрахованих значень зведеного натікання $\tilde{Q}_B$



а) K<1,5 **б) K≥1,5**

Рис. 4. Оцінка похибки, яка виникає при заміні точної формули розрахунку зведеного натікання $\tilde{Q}_B$ наближеною формулою (22)

На рис. 3 співставлені задані та розраховані значення зведеного натікання $\tilde{Q}_B$. Під заданими потрібно розуміти значення, визначені за формулами (18–20). Під розрахованими – визначені за формулою (22).

Для того, щоб оцінити похибку, яка виникає при заміні точної формули наближеною формулою (22), на рис. 4 представлена залежність розбіжності (у відсотках)заданих та розрахованих значень (позначена як Δ) від комплексу умов контактування K.

$$K = \frac{1{,}83\sigma_n}{E\,q} \ .$$

Для розрахунку натікання при в'язкісному плині газу Q_B отримано кінцеву розрахункову формулу:

$$Q_B = \frac{{m_0}^{3/2} d}{b\eta_B(1+S)^2}({p_2}^2 - {p_1}^2)\tilde{Q}_B \ . \qquad (23)$$

Висновки

Для випадку в'язкісного плину газу в циліндро-поршневому ущільненні отримано точну формулу розрахунку натікань [6]:

$$Q_B = \frac{\pi d}{5b\ \eta_B}\frac{V^3}{{S_K}^2}({p_2}^2 - {p_1}^2) \ ,$$

де d, b – відповідно діаметр та ширина ущільнюючої поверхні;

η_B – динамічна в'язкість газу;

p_2, p_1 – тиск газу на вході на виході ущільнюючого елементу ($p_2 > p_1$).

На підставі точної формули отримано розрахункову формулу:

$$Q_B = \frac{{m_0}^{3/2} d}{b\ \eta_B(1+S)^2}({p_2}^2 - {p_1}^2)\tilde{Q}_B \ ,$$

де

$$\tilde{Q}_B = \begin{cases} 0{,}055\ ln^{2{,}467}\left(1 + \frac{2{,}106}{K^{1{,}497}}\right), (K < 1{,}5); \\ 8{,}813 \cdot 10^{-5}\ ln^{4{,}452}\left(1 + \frac{94{,}247}{K^{2{,}37}}\right), (K \geq 1{,}5) \end{cases} .$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою (наближеною) формулою зведеного натікання $\tilde{Q}_B$, різняться не більше, ніж на 8%.

Натікання при перехідному режимі плину газу Q_U можна знайти на підставі значень, розрахованих для в'язкісного та молекулярного режимів:

$$Q_U = Q_B + zQ_M \ ,$$

де

$$z = \frac{1+1{,}25d_{\text{екв}}/\bar{\lambda}}{1+1{,}55d_{\text{екв}}/\bar{\lambda}} \ .$$

Література

1. Макушкин А.П. Исследование герметичности разъемных соединений при криогенных температурах / А.П. Макушкин, И.В. Крагельский, Н.М. Михин // Трение и износ. – 1988. – № 2. – С. 197–206.

2. Лыков Л.В. Тепломассообмен / Лыков Л.В. – М. : Энергия. 1971. – 560 с.

3. Бабкин В.Т. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем / Бабкин В.Т., Зайченко А.А. – М. : Машиностроение, 1977. – 120 с.

4. Шнейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды / Шнейдеггер А.Э. – М., 1960. – 250 с.

5. Айнбиндер С.Б. Введение в теорию трения полимеров / Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. – Рига : Зинатне, 1978. – 224 с.

6. Тимощук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. … канд. техн. наук / О.Г. Тимощук – Хмельницький, 2003. – 386 с.

References

1. Makushkin A.P. Investigation of the tightness of detachable joints at cryogenic temperatures / A.P. Makushkin, I.V. Kragelsky, N.M. Mikhin // Friction and wear. – 1988. – № 2.– P. 197–206.

2. Lykov L.V. Heat and mass transfer. – M.: Energy. – 1971. – 560 p.

3. Babkin V.T., Zaichenko A.A. Tightness of fixed connections of hydraulic systems. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 120 p.

4. Schneidegger A.E. Physics of fluid flow through porous media.– M., 1960. – 250 p.

5. Einbinder S.B., Tyunina E.L. Introduction to the theory of friction of polymers. – Riga: Zinatne, 1978. – 224 p.

6. Timoshchuk O.G. Development of methods for calculation and experimental study of the tightness of non-lubricating cylinder-piston seals: dis. … cand. tech. Sciences / O.G. Timoshchuk – Khmelnitsky, 2003. – 386 p.

Надійшла / Paper received : 26.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-297-301
УДК 51-7:664(045)

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, В.М. СЕРЕБРЕНИКОВ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ ПАСИВНОЇ ДОМІШКИ В РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПІД ВПЛИВОМ УЛЬТРАЗВУКУ

У статті розглядається питання розробки математичної моделі процесу дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку. При проходженні ультразвукової хвилі через рідке середовище відбувається явище акустичної кавітації. На відміну від гідродинамічної кавітації, вона виникає не локально, а за усім об'ємом рідини, оскільки викликається областями розрідження в ультразвуковій хвилі, тиск в яких нижчий за тиск насичених парів рідкого середовища. Наявність акустичної кавітації викликає труднощі математичного моделювання даного процесу. Як відомо, пасивна домішка в рідкому середовищі не впливає на гідродинаміку потоку і це дозволяє розглядати гідродинамічну задачу окремо від задачі масопереносу. Фізика процесу дифузії домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку доволі складна, але якісно її можна представити у такий спосіб: під час акустичної кавітації за усім об'ємом відбуваються коливання та схлопування бульбашок, із-за цього в системі утворюються мікроскопічні кумулятивні струмені та ударні хвилі, що сприяє інтенсифікації перемішування домішки в рідкому середовищі. Необхідно відзначити, що таке перемішування відбувається локально, без наявності макроскопічної течії. Це наводить на аналогію з турбулентністю, де визначальними є пульсації та дрібні вихори. Отже, одним із підходів до моделювання такого локального перемішування в теорії турбулентності є гіпотеза Буссінеска. Проте гіпотеза Буссінеска з теорії турбулентності дає можливість описати локальне перемішування, яке виникає при акустичній кавітації, за допомогою коефіцієнта кавітаційної дифузії. Це обумовило можливість застосування методів математичної фізики для моделювання процесу дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку. У процесі дослідження було обґрунтовано доцільність побудови математичної моделі у вигляді диференціального рівняння в приватних похідних другого порядку параболічного типу з граничними умовами другого типу.

Ключові слова: математичне моделювання, дифузія, пасивна домішка, рідке середовище, ультразвук.

V.P. KHOROLSKY, V.M. SEREBRENIKOV, YU. M. KORENETS
Donetsk National University of Economy and Trade named after Mikhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih

MATHEMATICAL MODELLING OF PASSIVE IMPURITY DIFFUSION IN A LIQUID MEDIUM UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASOUND

The article considers the question of developing a mathematical model of the process of diffusion of passive impurities in a liquid medium under the influence of ultrasound. When an ultrasonic wave passes through a liquid medium, the phenomenon of acoustic cavitation occurs. Unlike hydrodynamic cavitation, it does not occur locally, but throughout the volume of the liquid, because it is caused by rarefaction regions in the field of ultrasonic vibrations, the pressure of which is lower than the saturated vapour pressure of the liquid medium. The presence of acoustic cavitation causes difficulties in mathematical modelling of this process. As is known, the passive impurity in a liquid medium does not affect the hydrodynamics of the flow and this allows us to consider the hydrodynamic problem separately from the problem of mass transfer. The physics of the process of diffusion of impurities in a liquid medium under the influence of ultrasound is quite complex, but qualitatively it can be represented as follows: during acoustic cavitation throughout the volume there are oscillations and collapse of bubbles, due to this microscopic cumulative jets and shock waves are formed. intensification of impurity stirring in a liquid medium. It should be noted that such mixing occurs locally, without the presence of macroscopic flow. This is analogous to turbulence, where pulsations and small vortices are decisive. Thus, one of the approaches to modelling such local mixing in turbulence theory is the Boussinesq hypothesis. However, Boussinesq's hypothesis on the theory of turbulence makes it possible to describe the local mixing that occurs during acoustic cavitation using the cavitation diffusion coefficient. This made it possible to use the methods of mathematical physics to model the process of diffusion of passive impurities in a liquid medium under the influence of ultrasound. In the course of the research, the expediency of constructing a mathematical model in the form of a differential equation in partial derivatives of the second order of the parabolic type with boundary conditions of the second type was substantiated.

Key words: mathematical modelling, diffusion, passive impurity, liquid medium, ultrasound.

Постановка задачі

Розглядається задача дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі, через яку пропускається ультразвук. При проходженні ультразвукової хвилі через рідке середовище спостерігається акустична кавітація [1]. На відміну від другого відомого типу кавітації – гідродинамічної, вона виникає не локально, в місці найбільшої швидкості та найменшого тиску на поверхні обтічного тіла, а за усім об'ємом. Викликана акустична кавітація областями розрідження в ультразвуковій хвилі, тиск в яких нижче тиску насичених парів рідкого середовища.

Як відомо, пасивна домішка в рідкому середовищі не впливає на гідродинаміку потоку [2]. Це дозволяє розглядати гідродинамічну задачу окремо від завдання масопереносу, що істотно спрощує вивчення процесу.

Аналіз досліджень та публікацій

Фізика процесу дифузії домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку досить складна, але якісно її можна представити у такий спосіб. При акустичній кавітації за усім об'ємом відбуваються коливання і схлопування бульбашок. При схлопуванні утворюються мікроскопічні кумулятивні струмені та ударні хвилі. Це сприяє інтенсифікації перемішування домішки в середовищі [3].

Необхідно відзначити, що таке перемішування відбувається локально, без наявності макроскопічної течії. Це наводить на аналогію з турбулентністю, де визначальними є пульсації і дрібні вихори [4].

Одним з підходів до моделювання такого локального перемішування в теорії турбулентності є гіпотеза Буссінеска [5]. Відповідно до цієї гіпотези, процес може бути описаний введенням коефіцієнта турбулентної дифузії. Він на кілька порядків перевищує коефіцієнт молекулярної дифузії, що свідчить про високу інтенсивність турбулентного масообміну.

У даній роботі прийнято, відповідно до гіпотези Буссінеска в теорії турбулентності, що локальне перемішування при акустичній кавітації моделюється за допомогою коефіцієнта кавітаційної дифузії.

Далі, в [6] було відзначено, що інтенсивність ультразвукової хвилі при її поширенні в середовищі, убуває за експоненціальним законом. Таким чином, має місце аналог закону Бугера-Ламберта-Бера, відомого з оптики [7].

Формулювання цілей

Метою статті є побудова зручної та об'єктивної математичної моделі процесу дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі під дією ультразвуку для подальшого використання в розробці інтелектуальних систем моніторингу та управління подібними технологічними процесами харчових виробництв, зокрема, хлібопекарської галузі та вирішенні інших наукових та інженерних завдань.

Виклад основного матеріалу дослідження

Припустимо, що коефіцієнт кавітації дифузії пропорційний інтенсивності ультразвуку. Тоді його залежність від пройденого ультразвуковою хвилею шляху, згідно з припущенням про експоненційний закон загасання, має вигляд:

$$D = D_0 \exp(-kx), \tag{1}$$

де D – коефіцієнт кавітації дифузії, м^2/с;

D_0 – коефіцієнт кавітації дифузії на вході в середу, м^2/с;

k – коефіцієнт поглинання ультразвуку рідким середовищем, 1/м;

x – координата, спрямована в бік поширення ультразвукової хвилі, м, (початок координат розташовано на вході до середовища).

Оскільки рідке середовище з домішкою макроскопічно нерухоме, еволюція в часі концентрації домішки з урахуванням (1) описується лінійним диференціальним рівнянням в приватних похідних другого порядку параболічного типу [8]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial c}{\partial x}\right) = D_0\frac{\partial}{\partial x}\left(\exp(-kx)\frac{\partial c}{\partial x}\right), \tag{2}$$

де c – концентрація домішки у середовищі, кг/м;

t – час, с.

Для зручності рішення і подальшого дослідження доцільно привести рівняння (2) до безрозмірного вигляду, скориставшись теорією подібності та розмірностей [9]. З цією метою введемо безрозмірні змінні

$$\xi = k \cdot x\,,\ \tau = t \cdot D_0 \cdot k^2. \tag{3}$$

Мінлива ξ визначає безрозмірну відстань, пов'язану з величиною коефіцієнта поглинання ультразвуку рідким середовищем k. У свою чергу, змінна τ визначає безрозмірний час протікання поглинання ультразвуку рідким середовищем, пов'язаний як з початковим значенням коефіцієнта кавітаційної дифузії D_0, так і з коефіцієнтом поглинання ультразвуку рідким середовищем k.

З урахуванням заміни (3) диференційне рівняння (2) в безрозмірному вигляді запишеться так:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(exp(-\xi)\frac{\partial c}{\partial \xi}\right). \tag{4}$$

Важливо підкреслити ще одну особливість рівняння (4). Перехід до безрозмірного вигляду опису процесу, що моделюється, дає можливість зменшити кількість незалежних параметрів, перетворивши їх у комплекси, представлені у вигляді множень. Так, в даному випадку концентрація, що моделюється, залежить від чотирьох параметрів (x, t, k, D_0). У безрозмірному вигляді ця залежність визначається тільки двома параметрами ξ і τ. Природно, що дослідження концентрації від двох параметрів є значно простішим. Крім того, як зазначено в [10], задаючи безрозмірним параметрам певні величини, можна отримати нескінчене число значень розмірних величин відповідно до формул (3).

Розглянемо постановку крайової задачі. Приймаємо, що ультразвукова хвиля проходить крізь шар рідкого середовища завтовшки l. Координати меж середовища: $x = 0$ та $x = l$. На межах середовища повинні виконуватися нульові граничні умови другого роду для потоку домішки [11]:

$$\frac{\partial c}{\partial x}(0,t) = \frac{\partial c}{\partial x}(l,t) = 0,$$

або в безрозмірному вигляді:

$$\frac{\partial c}{\partial \xi}(0,\tau) = \frac{\partial c}{\partial \xi}(\xi_0,\tau) = 0, \tag{5}$$

де $\xi_0 = k \cdot l$..

Початкову умову для задачі, що розглядається, запишемо у вигляді:

$$c(x,0) = a \cdot \varphi(x)\,, \tag{6}$$

де $a -$ постійна.

Для знаходження постійної a скористуємося тим, що в шарі рідкого середовища, що розглядається,

знаходиться задана кількість домішки. Ця умов записується у вигляді:

$$\int_0^l c(x,0)dx = m, \tag{7}$$

де m - задана кількість домішки, кг.

Беручи до уваги (6), умова (7) запишеться у вигляді:

$$a \cdot \int_0^l \varphi(x)dx = m. \tag{8}$$

Тоді, відповідно (8), знаходимо:

$$a = \frac{m}{\int_0^l \varphi(x)dx}. \tag{9}$$

У результаті початкова умова (6) з урахуванням (9) запишеться так:

$$c(x,0) = \frac{m}{\int_0^l \varphi(x)dx}\,\varphi(x). \tag{10}$$

Така початкова умова визначає нерівномірний розподіл концентрації домішки в початковий момент часу.

У безрозмірному вигляді початкова умова (10) приймає вигляд:

$$c(\xi,0) = \frac{m\cdot k}{\int_0^{\xi_0} \varphi_1(\xi)d\xi}\varphi_1(\xi), \tag{11}$$

де $\varphi_1(\xi)$ – запис функції $\varphi(x)$ в безрозмірному вигляді.

З огляду на запис початкового умови (11), природно перейти до безрозмірної величини концентрації домішки в рідкому середовищі, відповідно до рівняння:

$$\hat{c}(\xi,\tau) = \frac{c(\xi,\tau)}{m\cdot k}\int_0^{\xi_0} \varphi_1(\xi)d\xi. \tag{12}$$

З огляду на (4), (5), (11) і (12), загальна постановка задачі математичного моделювання дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку в безрозмірному вигляді набуває вигляду:

$$\frac{\partial \hat{c}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(exp(-\xi)\frac{\partial \hat{c}}{\partial \xi}\right), \tag{13}$$

$$\hat{c}(\xi,0) = \varphi_1(\xi), \tag{14}$$

$$\frac{\partial \hat{c}}{\partial \xi}(0,\tau) = 0, \tag{15}$$

$$\frac{\partial \hat{c}}{\partial \xi}(\xi_0,\tau) = 0. \tag{16}$$

Залежність коефіцієнта кавітаційної дифузії від просторової координати ускладнює рішення завдання (13), ..., (16). У свою чергу, для конкретного рішення задачі (13), ..., (16) необхідно задати функцію, яка визначатиме початковий розподіл домішки в рідкому середовищі.

Згідно до змісту задачі, що вирішується, необхідно вибрати таку початкову умову (6), щоб потік домішки на кордонах шару дорівнював нулю. Ця умова може бути вибрана, наприклад, такою:

$$c(x,0) = a \cdot x^2(x-l)^2. \tag{17}$$

Початкова умова (17) визначає нерівномірний розподіл концентрації домішки (згусток посередині шару) в початковий момент часу.

У свою чергу, згідно з (8), має місце:

$$a \cdot \int_0^l x^2(x-l)^2 dx = m. \tag{18}$$

Інтегруючи у (18), знаходимо:

$$a \cdot \frac{l^5}{30} = m. \tag{19}$$

Із (19) знаходимо:

$$a = \frac{30m}{l^5}. \tag{20}$$

У свою чергу, початкова умова (17) в безрозмірному вигляді запишеться так:

$$c(\xi,0) = \frac{30m}{l^5k^4}\xi^2(\xi-\xi_0)^2,$$

або

$$\hat{c}(\xi,0) = \xi^2(\xi-\xi_0)^2, \tag{21}$$

де $\hat{c}(\xi,0) = c(\xi,0)\frac{l^5k^4}{30m}$.

Таким чином, з урахуванням початкового розподілу концентрації домішки (21) в рідкому середовищі може бути знайдене конкретне рішення даної задачі (13), (15) і (16).

Разом з тим, вважаємо за доцільне оцінити асимптотичну величину концентрації домішки в рідкому середовищі, яка настане при стаціонарному перебігу процесу дифузії. Для цього у формулі (13) достатньо прирівняти нулю швидкість протікання дифузії. В результаті отримаємо звичайне диференціальне рівняння [12]:

$$\frac{d}{d\xi}\left(exp(-\xi)\frac{d\hat{c}}{d\xi}\right) = 0. \tag{22}$$

Рішення рівняння (22) вдається шляхом послідовного інтегрування. На першому кроці інтегрування отримуємо:

$$\exp(-\xi)\frac{d\hat{c}}{d\xi} = A, \tag{23}$$

де A - довільна постійна.

На другому кроці послідовно отримуємо:

$$\frac{d\hat{c}}{d\xi} = A \cdot exp(\xi)$$
$$\int d\hat{c} = A \cdot \int exp(\xi) d\xi$$
$$\hat{c} = A \cdot exp(\xi) + B, \quad (24)$$

де B - довільна постійна.

Для знаходження довільних постійних скористаємося граничними умовами (15) і (16). Послідовно знаходимо:

$$\widehat{c'} = A \cdot exp(\xi), \quad \widehat{c'}(0) = A \cdot exp(0) = 0, \quad A = 0. \quad (25)$$

Друга гранична умова не дозволяє знайти другу постійну. Таким чином, стаціонарне рішення має вигляд:

$$\hat{c}_s = B. \quad (26)$$

Відповідно до рівності (26) можна зробити попередній висновок, що в стаціонарному стані концентрація домішок в рідкому середовищі буде постійною. Для знаходження цієї величини концентрації скористаємося тим, що в процесі дифузії домішки в рідкому середовищі загальна маса домішки залишається постійною.

Користуючись початковою умовою (14), знаходимо загальну масу домішки в безрозмірному вигляді:

$$\int_0^{\xi_0} \varphi_1(\xi) d\xi. \quad (27)$$

Тоді, враховуючи (26) и (27), згідно збереженню маси домішки в рідкому середовищі, можна записати:

$$\int_0^{\xi_0} \varphi_1(\xi) d\xi = \hat{c}_s \cdot \xi_0. \quad (28)$$

З рівності (28) знаходимо величину стаціонарної концентрації домішки в рідкому середовищі, яку шукаємо:

$$\hat{c}_s = \frac{1}{\xi_0} \int_0^{\xi_0} \varphi_1(\xi)\, d\xi. \quad (29)$$

Для отримання конкретних результатів скористаємося початковим розподілом концентрації (21). Враховуючи що

$$\int_0^{\xi_0} \xi^2 (\xi - \xi_0)^2 d\xi = \frac{\xi_0^5}{30},$$

знаходимо, відповідно (28), величину стаціонарної концентрації домішки в рідкому середовищі, яку шукаємо:

$$\hat{c}_s = \frac{\xi_0^4}{30}. \quad (30)$$

На рис. 1 показані графіки початкової та стаціонарної концентрацій домішки в рідкому середовищі.

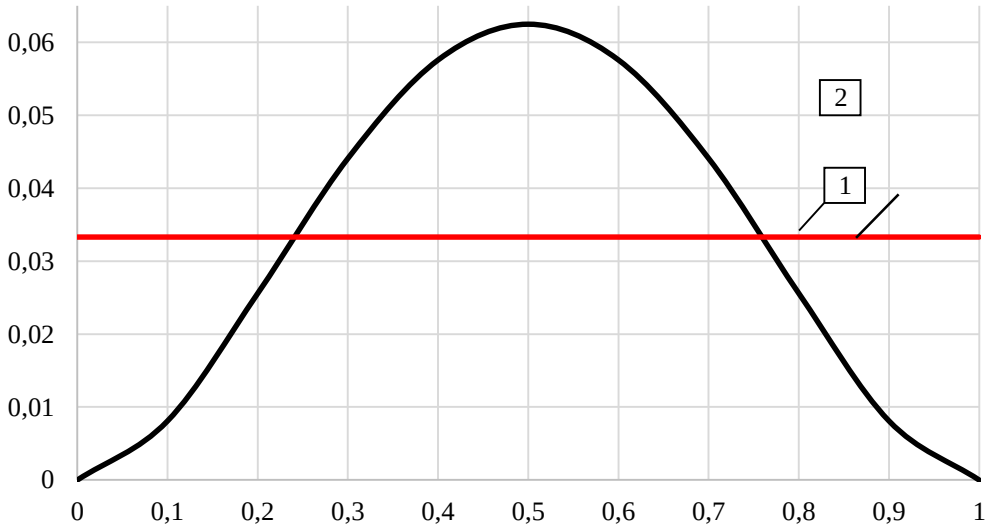


Рис. 1. Розподіл концентрації домішки в рідкому середовищі ($\xi_0 = 1$)
(1 – початковий розподіл концентрації домішки в рідкому середовищі;
2 – стаціонарний розподіл концентрації домішки в рідкому середовищі)

Висновки

Аналіз процесу дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку показав

його виняткову складність, обумовлену, зокрема, наявністю акустичної кавітації. Це дозволяє зробити висновок про труднощі математичного моделювання даного процесу.

Гіпотеза Буссінеска з теорії турбулентності дала можливість описати локальне перемішування при акустичної кавітації за допомогою коефіцієнта кавітаційної дифузії, що вказало на можливість застосування методів математичної фізики для моделювання процесу дифузії пасивної домішки в рідкому середовищі під впливом ультразвуку.

Зазначено на доцільність побудови математичної моделі у вигляді диференціального рівняння в приватних похідних другого порядку параболічного типу з граничними умовами другого типу.

Література

1. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк – М. : Наука, 2008. – 271 с.

2. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. Ч. 1 / А. С. Монин, А. М. Яглом – М. : Наука, 1965. – 641 с.

3. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях / Г. Флинн ; [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1967. – Т. 1. – 138 с.

4. Ландау Л. Д, Лифшиц Е. М. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.

5. Алексин В. А. Математические модели турбулентных течений : учебное пособие / В. А. Алексин. – М. : МГИУ, 2008. – 54 с.

6. Дейниченко Г. В. Теоретичне та експериментальне визначення раціональної тривалості ультразвукової обробки для отримання водно-жирових емульсій / Г. В. Дейниченко, Г. М. Постнов, В. М. Червоний, В. О. Старков // Праці ТДАТУ, вип.17, Т. 1. – Мелітополь : ТДАТУ, 2017.– С. 34–40.

7. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд., стереот. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.

8. Мартинсон Л. К. Дифференциальные уравнения математической физики / Л. К. Мартинсон, Ю. И. Малов. – М. : МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. – 368 с.

9. Гухман А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М. : Высшая школа, 1973. – 296 с.

10. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1987. – 423 с.

11. Владимиров В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. – М. : Наука, 1981. – 512 с.

12. Филиппов А. Ф. Введение в теорию дифференциальных уравнений / А. Ф. Филиппов. – Изд. 2-е. – М. : Наука, 2007. – 240 с.

13. Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. Метод разделения переменных в математической физике / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин. – СПб, 2009. – 92 с.

14. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. – М. : Наука, 1988. – 159 с.

15. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики : учебное пособие / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – 6-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 798 с.

16. Васильев А. Excel 2010 на примерах / А. Васильев. – М. : БХВ – Петербург, 2010. – 432 с.

17. Карманов В. П. Математическое программирование / В. П. Карманов. – М. : Наука, 1986. – 286 с.

References

1. Sirotyuk M. G. Akusticheskaya kavitaciya / M. G. Sirotyuk – M. : Nauka, 2008. – 271 s.

2. Monin A. S. Statisticheskaya gidromehanika. Ch. 1 / A. S. Monin, A. M. Yaglom – M. : Nauka, 1965. – 641 s.

3. Flinn G. Fizika akusticheskoj kavitacii v zhidkostyah / G. Flinn ; [per. s angl.]. – M. : Mir, 1967. – T. 1. – 138 s.

4. Landau L. D, Lifshic E. M. Gidrodinamika / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M. : Nauka, 1986. – 736 s.

5. Aleksin V. A. Matematicheskie modeli turbulentnyh techenij : uchebnoe posobie / V. A. Aleksin. – M. : MGIU, 2008. – 54 s.

6. Deinychenko H. V. Teoretychne ta eksperymentalne vyznachennia ratsionalnoi tryvalosti ultrazvukovoi obrobky dlia otrymannia vodno-zhyrovykh emulsii / H. V. Deinychenko, H. M. Postnov, V. M. Chervonyi, V. O. Starkov // Pratsi TDATU, vyp.17, T. 1. – Melitopol : TDATU, 2017.– S. 34–40.

7. Landsberg G. S. Optika / G. S. Landsberg. – 6-e izd., stereot. – M. : FIZMATLIT, 2003. – 848 s.

8. Martinson L. K. Differencialnye uravneniya matematicheskoj fiziki / L. K. Martinson, Yu. I. Malov. – M. : MGTU imeni N.E. Baumana, 2002. – 368 s.

9. Guhman A. A. Vvedenie v teoriyu podobiya / A. A. Guhman. – M. : Vysshaya shkola, 1973. – 296 s.

10. Sedov L. I. Metody podobiya i razmernosti v mehanike / L. I. Sedov. – M. : Nauka, 1987. – 423 s.

11. Vladimirov V. S. Uravneniya matematicheskoj fiziki / V. S. Vladimirov. – M. : Nauka, 1981. – 512 s.

12. Filippov A. F. Vvedenie v teoriyu differencialnyh uravnenij / A. F. Filippov. – Izd. 2-e. – M. : Nauka, 2007. – 240 s.

13. Zajcev V. F., Polyanin A. D. Metod razdeleniya peremennyh v matematicheskoj fizike / V. F. Zajcev, A. D. Polyanin. – SPb, 2009. – 92 s.

14. Kompyutery, modeli, vychislitelnyj eksperiment. – M. : Nauka, 1988. – 159 s.

15. Tihonov A. N. Uravneniya matematicheskoj fiziki : uchebnoe posobie / A. N. Tihonov, A. A. Samarskij. – 6-e izd., ispr. i dop. – M. : Izd-vo MGU, 1999. – 798 s.

16. Vasilev A. Excel 2010 na primerah / A. Vasilev. – M. : BHV – Peterburg, 2010. – 432 c.

17. Karmanov V. P. Matematicheskoe programmirovanie / V. P. Karmanov. – M. : Nauka, 1986. – 286 s.

Надійшла / Paper received : 05.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-301-305
УДК 677.024.3

В.Ю. ЩЕРБАНЬ, О.З. КОЛИСКО,
Ю.Ю. ЩЕРБАНЬ, М.І. ШОЛУДЬКО, Г.В. МЕЛЬНИК
Київський національний університет технологій та дизайну

СТРУКТУРА ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ ТА ПРОЦЕДУР КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ РЕКУРСІЇ

На основі реалізації алгоритму рекурсії розроблені модулі та процедури комп'ютерної програми для визначення натягу нитки в робочій зоні текстильних та трикотажних машин у випадку використання різних типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора. Представлені програмні модулі та процедури для визначення натягу, при використанні основних елементів для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора системи подачі нитки на текстильних та трикотажних машинах, комп'ютерної програми реалізації алгоритму рекурсії. Представлені програмні модулі та процедури комп'ютерної програми для визначення натягу в робочій зоні на текстильних та трикотажних машинах з урахуванням діаметру перетину нитки, її фізико-механічних властивостей для широкого спектру комплексних ниток та пряжі. Програмними модулями передбачена можливість завдання закону зміни діаметру перетину нитки у вигляді гармонічної функції або довільній функції користувача з використанням зворотних польських записів у вигляді транслятора.

Ключові слова: комп'ютерна програма, процедури, алгоритм рекурсії, програмні модулі, нитка, шайбовий натягувач нитки, транслятор.

V. SHCHERBAN, O. KOLISKO, Y. SHCHERBAN, M. SHOLUDKO, G. MELNIK
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

STRUCTURE OF SOFTWARE MODULES AND PROCEDURES OF A COMPUTER PROGRAM FOR THE BASIC ELEMENTS OF THE SYSTEM IN THE IMPLEMENTATION OF THE RECURSION ALGORITHM

Based on the implementation of the recursion algorithm, modules and procedures of a computer program for determining the tension of the thread in the working area of textile and knitting machines in the case of using different types of devices to provide tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and torus surfaces. Software modules and procedures for determining tension, using basic elements to provide tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of a torus of the thread feed system on textile and knitting machines, a computer program for the implementation of the recursion algorithm. Software modules and computer program procedures for determining the tension in the working area on textile and knitting machines, taking into account the diameter of the thread, its physical and mechanical properties for a wide range of complex threads and yarns. The software modules provide the possibility of setting the law of changing the diameter of the thread in the form of a harmonic function or an arbitrary function of the user using inverse Polish records in the form of a translator.

Simple textile and knitting machines are associated with the elimination of thread breakage. This negatively affects the productivity of textile and knitwear machines, reduces the quality of textiles and knitwear. The main parameter of optimization of the thread feed system on textile and knitting machines is the minimum required tension in the working area. The breakage of threads during processing on textile and knitting machines is due to the imperfection of the thread feeding system on technological machines and its components. The largest number of breaks falls on the area of different types of devices to provide tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of a torus. Studies of the influence of the design of different types of devices to provide tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of a torus on the conditions of their interaction with the thread taking into account its uneven cross-sectional diameter are important in determining tension in the working area. The thread tension increases when passing through the refueling zones of the thread supply system on textile and knitting machines. This increase is due to the interaction of the thread with different types of devices to provide tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of a torus. The maximum value of tension will be in front of the working area of technological machines. Minimizing the tension in front of the work area is important for improving technological processes from the standpoint of improving the productivity of technological machines and product quality. Thus, the topic of this article is relevant, which is important for improving the system of thread supply on textile and knitting machines, the design of existing types of devices to provide tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of torus.

Development of special computer programs for determining the tension in the working area of textile fabric and knitwear on textile and knitwear machines allows you to quickly determine the necessary technological parameters, to adjust both the structure and components of the thread feed system on technological machines to obtain the minimum required tension in the working area of the formation of textile fabrics and knitwear.

Objects and methods of research. Various types of devices for providing tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of a torus are an integral part of the thread feeding system of textile and knitting machines. The imperfection of the design of different types of devices for providing tension and guide elements in the form of cylindrical surfaces and surfaces in the form of a torus on technological machines leads to fluctuations in the tension of the thread during its processing and violation of the technological regime. The theoretical basis for solving scientific and technical problems are the works of leading scientists in the fields of technology of textile and knitwear production, textile materials science, thread mechanics, elasticity theory, mathematical modeling. Theoretical and experimental research uses methods of theoretical mechanics, resistance of materials, experimental planning and statistical processing of research results.

Keywords: computer program, procedures, recursion algorithm, software modules, thread, thread washer, translator.

Вступ. *Актуальність*. Простої текстильних та трикотажних машин пов'язані з ліквідацією обриву нитки. Це негативно впливає на продуктивність текстильних та трикотажних машин, зменшує якість текстильного полотна та трикотажних виробів. Головним параметром оптимізації системи подачі ниток на

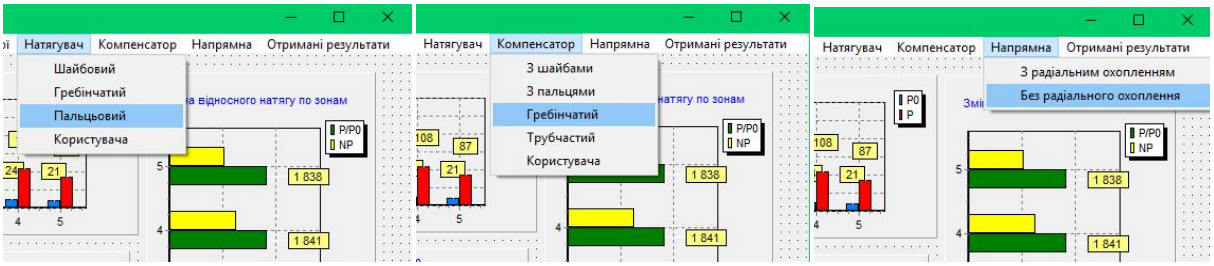
текстильних та трикотажних машинах є мінімально необхідний натяг в робочій зоні [3, 6-10]. Обривність ниток при переробці на текстильних та трикотажних машинах пов'язана з недосконалістю системи подачі нитки на технологічних машинах і її складових елементів[3]. Найбільше число обривів випадає на зону розташування різних типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора [4-12]. Дослідження впливу конструкції різних типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора на умови їх взаємодії з ниткою з урахуванням її нерівномірності по діаметру поперечного перетину мають важливе значення при визначенні натягу в робочій зоні[3, 10-12]. Натяг нитки збільшується при переході по зонах заправки системи подачі нитки на текстильних та трикотажних машинах. Це збільшення обумовлено взаємодією нитки з різними типами пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора [3]. Максимального значення натягу буде перед робочою зоною технологічних машин. Мінімізація натягу перед робочою зоною має важливе значення для удосконалення технологічних процесів з позиції підвищення продуктивності технологічних машин та якості продукції що випускається. Таким чином, тема даної статті є актуальною, яка має важливе значення для удосконалення системи подачі ниток на текстильних та трикотажних машинах, конструкції існуючих типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора [4-11].

Розробка спеціальних комп'ютерних програм [1, 2] для визначення натягу в робочій зоні формування текстильного полотна та трикотажних виробів на текстильних та трикотажних машинах дозволяє оперативно визначати необхідні технологічні параметри, провадити корегування, як самої структури так і складових компонентів системи подачі нитки на технологічних машинах для отримання мінімально необхідного натягу в робочій зоні формування текстильного полотна та трикотажних виробів [3, 4-12].

Об'єкти і методи дослідження. Складовою частиною системи подачі нитки текстильних та трикотажних машин є різні типи пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора. Недосконалість конструкції різних типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора на технологічних машинах призводить до коливання натягу нитки в процесі її переробки та порушенню технологічного режиму. Теоретичною основою при вирішенні науково-технічної проблеми є праці провідних вчених в галузях технології текстильного та трикотажного виробництв, текстильного матеріалознавства, механіки нитки, теорії пружності, математичного моделювання. У теоретичних та експериментальних дослідженнях використано методи теоретичної механіки, опору матеріалів, планування експерименту та статистичної обробки результатів досліджень.

Постановка завдання. На основі реалізації алгоритму рекурсії розробити модулі та процедури комп'ютерної програми для визначення натягу нитки в робочій зоні текстильних та трикотажних машин у випадку використання різних типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора.

Основна частина. Головна форма комп'ютерної програми представлена модулем unit Unit2, на якій розташоване головне меню MainMenu1: TMainMenu. В головному меню розташовані три компонента N5: TMenuItem, N6: TMenuItem, N7: TMenuItem основних елементів для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора системи подачі нитки на текстильних та трикотажних машинах. На рис.1а представлений компонент для натягувачів нитки N5: TMenuItem, який включає чотири процедури: procedure N19Click(Sender: TObject) – для шайбового натягувача; procedure N20Click(Sender: TObject) – для гребінчатого натягувача; procedure N21Click(Sender: TObject) – для пальцьового натягувача; procedure N45Click(Sender: TObject) – для натягувача користувача. На рис.1б представлений компонент для компенсаторів натягу N6: TMenuItem, який включає п'ять процедур: procedure N22Click(Sender: TObject) – для компенсатора з шайбами; procedure N23Click(Sender: TObject) – для компенсатора з пальцями; procedure N24Click(Sender: TObject) – для гребінчатого компенсатора; procedure N25Click(Sender: TObject) – для трубчастого компенсатора; procedure N46Click(Sender: TObject) – для компенсатора користувача. На рис.1в представлений компонент для напрямного елементу N7: TMenuItem, який включає дві процедури: procedure N26Click(Sender: TObject) – для напрямної з радіальним охопленням; procedure N27Click(Sender: TObject) – для напрямної без радіального охоплення.



а **б** **в**

Рис.1. Компоненти головного меню MainMenu1: TMainMenu модуля unit Unit2: N5: TMenuItem, N6: TMenuItem, N7: TMenuItem

Математичне забезпечення процедури procedure N21Click(Sender: TObject) має вигляд

$$P_1 = P_O[1-\frac{r+r_H}{r}(1-e^{\mu_3\gamma_1})]e^{2\pi k\mu_4 \sin\phi}[1-\frac{r+r_H}{r}(1-e^{\mu_3\gamma_2})], \quad (1)$$

де μ_3, μ_4 - коефіцієнти тертя відповідно між ниткою та поверхнею отворів та направляючого циліндру(пальця); γ_1, γ_2 - кути огинання ниткою направляючих поверхонь отворів на вході та виході з натягувача нитки; k - кількість повних обертів нитки навколо направляючого циліндру; ϕ - кут нахилу вісі нитки до утворюючій направляючого циліндру.

Математичне забезпечення процедури procedure N24Click(Sender: TObject) має вигляд

$$P\sin\alpha = mg - m\frac{d^2y}{dt} - c\frac{dy}{dt} - P_O\sin\alpha - \mu_2 P_O\cos\alpha(e^{2\mu_1\alpha}-1), \quad (2)$$

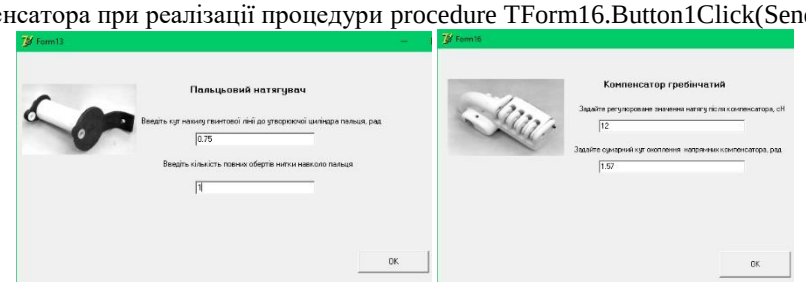
де y - вертикальна ордината; c - коефіцієнт, враховуючий вплив форми поперечного перетину поршня на силу опору; μ_2 - коефіцієнт тертя між штовхачем поршня та вертикальними спрямовувачами; P_O - вхідний натяг нитки; μ_1 - коефіцієнт тертя між ниткою та циліндричною напрямною; 2α - кут охоплення ниткою циліндричної напрямної; t - час.

Математичне забезпечення процедури procedure N27Click(Sender: TObject) має вигляд

$$P_{i+1} = P_i[1+\frac{(R_j+r)}{[R_j+r(1-\delta_{0j})]}(e^{\frac{\beta_j}{\sin\beta_j}\frac{a}{P_i^b}R_j{}^b\phi_j}-1)] + \left[\frac{B}{2[R_j+r(1-\delta_j)]^2}\right], \quad (3)$$

де P_{i+1} – натяг нитки після j конструктивного елементу ; P_i – натяг нитки до j конструктивного елементу; R_j – радіус кривизни поверхні j конструктивного елементу; δ_{0j} – початкова деформація перетину нитки при набіганні на j конструктивний елемент; δ_j – кінцева деформація перетину нитки при збіганні з j конструктивного елементу; β_j – кут радіального охоплення нитки поверхнею j конструктивного елементу; φ_j – реальний кут охоплення ниткою j конструктивного елементу.

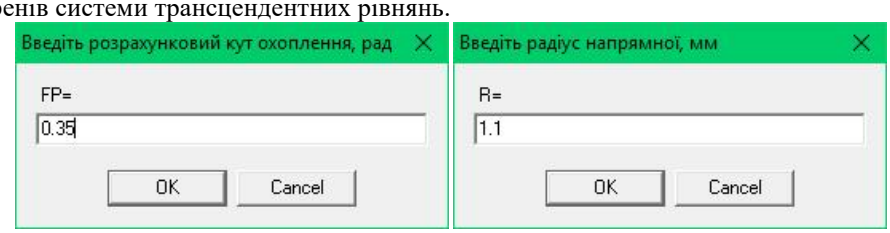
На рис.2а представлений модуль unit Unit13 для пальцьового натягувача при реалізації процедури procedure TForm13.Button1Click(Sender: TObject). На рис.2б представлений модуль unit Unit16 для гребінчатого компенсатора при реалізації процедури procedure TForm16.Button1Click(Sender: TObject).



а **б**

Рис.2. Модулі комп'ютерної програми unit Unit13 та unit Unit16

На рис.3а,б представлені графічні образи при виконанні операторів FP1:=InputBox та R:=InputBox при реалізації процедури procedure TForm2.N27Click(Sender: TObject), яка відповідає за визначення натягу нитки при взаємодії з циліндричною напрямною у випадку без радіального охоплення. В цій процедурі вкладена процедура procedure V1(var F:Real;X,P0,BSLN,RN,E1N,BGN,FP,AT,BT,R1,d0,kt,V11:Real) для визначення коренів системи трансцендентних рівнянь.



а **б**

Рис.3. Оператори FP1:=InputBox та R:=InputBox модуля комп'ютерної програми unit Unit2

На рис.4 представлені розрахунки натягу бавовняної пряжі 27,6 текс на текстильній машині для

випадку трьох зон з пальцьовим пристроєм для натягу, гребінчатим компенсатором та напрямної без радіального охоплення. Початковий натяг приймався рівним 5 сН. Проміжні дані представлені у відповідних вікнах форм на рис.2а,б та рис.3а,б. Аналіз отриманих результатів показав, що натяг зростає від першої до третьої зони зони. На окремій діаграмі представлені результати зміни відносного натягу по зонах. Найбільше зростання відносного натягу спостерігається у третій зоні, де має місце взаємодія нитки з напрямною великої кривини.

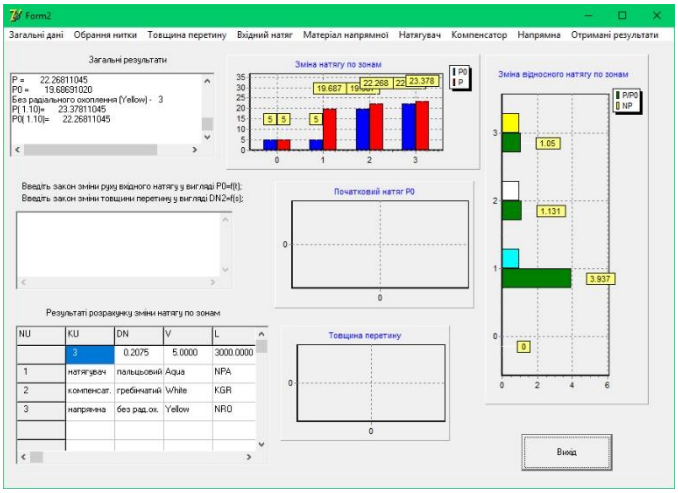


Рис.4. Результати розрахунку натягу бавовняної пряжі в робочій зоні

Висновки. На основі реалізації алгоритму рекурсії розроблені модулі та процедури комп'ютерної програми для визначення натягу нитки в робочій зоні текстильних та трикотажних машин у випадку використання різних типів пристроїв для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора. Представлені програмні модулі та процедури для визначення натягу, при використанні основних елементів для забезпечення натягу та направляючих елементів у формі циліндричних поверхонь та поверхонь у формі тора системи подачі нитки на текстильних та трикотажних машинах, комп'ютерної програми реалізації алгоритму рекурсії. Представлені програмні модулі та процедури комп'ютерної програми для визначення натягу в робочій зоні на текстильних та трикотажних машинах з урахуванням діаметру перетину нитки, її фізико-механічних властивостей для широкого спектру комплексних ниток та пряжі. Програмними модулями передбачена можливість завдання закону зміни діаметру перетину нитки у вигляді гармонічної функції або довільній функції користувача з використанням зворотних польських записів у вигляді транслятора.

Література

1. Свідоцтво № 89242 про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма для реалізації чисельних методів» / Щербань В.Ю., Колиско О.З., Макаренко Ю.В., Мельник Г.В., Петко А.К., Шолудько М.І., Калашник В.Ю. – Дата реєстрації 03.06.2019 р.

2. Свідоцтво № 89243 про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма «Програмний комплекс для визначення оптимальної траєкторії нитки на трикотажних машинах»» / Щербань В.Ю., Колиско О.З., Макаренко Ю.В., Мельник Г.В., Петко А.К., Шолудько М.І., Калашник В.Ю. – Дата реєстрації 03.06.2019 р.

3. Щербань В.Ю. Комп'ютерне проектування систем: програмні та алгоритмічні компоненти / В.Ю.Щербань, О.З.Колиско, Г.В.Мельник, М.І.Шолудько, В.Ю.Калашник. – К.:Освіта України, 2019. – 902 с.

4. Щербань В.Ю. Оптимізація процесу взаємодії нитки з напрямними з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей/ В.Ю.Щербань, М.І.Шолудько, О.З.Колиско, В.Ю.Калашник // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – 225(3). - С.30-33.

5. Щербань В.Ю. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі/ В.Ю.Щербань, В.Ю.Калашник, О.З.Колиско, М.І.Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – 223(2). - С.25-29.

6. Математичні моделі в САПР. Обрані розділи та приклади застосування/В.Ю.Щербань, С.М.Красницький, В.Г.Резанова. - К.:КНУТД, 2011. -220 с

7. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry / V.Yu.Scherban, O.Z.Kolisko, M.I.Sholudko, V.Yu.Kalashnik. - K.: Education of Ukraine, 2017. - 745 p.

8. Щербань В.Ю. Ефективність роботи компенсаторів натягу нитки трикотажних машин/В.Ю.Щербань, Н.І.Мурза, А.М. Кириченко, М.І.Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.- 2017.- №1(245). - с.83-86.

9. Scherban V. Equalizations of dynamics of filament interactive with surface/V. Scherban, G. Melnik, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sheludko//Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill,

Ontario, Canada. – January/February 2017. – Volume 6.- Number 1. – P. 22-26.

10. Щербань В.Ю. Порівняльний аналіз роботи нитконатягувачів текстильних машин/ В.Ю.Щербань, Н.І.Мурза, А.М. Кириченко, М.І.Шолудько// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.- 2016.-№6(243). - с.18-21.

11. Scherban V. Basic parameters of curvature and torsion of the deformable thread in contact with runner/V. Scherban, N.Murza, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sholudko //Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – Nov/Des - 2016. – Volume 10. Number 2. – P. 18-23.

12. Scherban V. Kinematics of threads cooperates with the guiding surfaces of arbitrary profile /V. Scherban, N. Murza, O. Kolisko, M. Sheludko, I. Semenova //Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May/June - 2016. – Volume 5.- Number 3. – P. 23-27.

References

1. Certificate No. 89242 on the registration of copyright for the work "Computer program for the implementation of numerical methods" / Shcherban V.Yu., Kolisko OZ, Makarenko YV, Melnyk GV, Petko AK ., Sholudko MI, Kalashnik V.Yu. - Registration Date 03.06.2019.

2. Certificate No. 89243 on the registration of copyright for the work "Computer program" Software complex for determining the optimal trajectory of the thread on knitting machines "/ Shcherban V.Yu., Kolisko OZ, Makarenko YV, Melnyk G. .V., Petko AK, Sholudko MI, Kalashnik V.Yu. - Registration Date 03.06.2019.

3. Shcherban V.Yu. Computer systems design: software and algorithmic components / VY Shcherban, OZ Kolisko, GV Melnyk, MI Sholudko, VY Kalashnik. - K.: Education of Ukraine, 2019. - 902 p.

4. Scherban V.Y., Sholudko M.I., Kolisko O.Z., Kalashnik V.Y. Optimization of the process of interaction of a thread with guides, taking into account the anisotropy of frictional properties. Herald of Khmelnytskyi National University.2015.225(3).pp.30-33.

5. Scherban. V.Y., Kalashnik V.Y., Kolisko O.Z., Sholudko M.I. Investigation of the influence of the thread material and the anisotropy of friction on its tension and the shape of the axisю. Herald of Khmelnytskyi National University.2015.223(2).pp.25-29/

6. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application/V. Yu. Scherban, SM Krasnitsky, VG Rezanov.-K.:KNUTD.2011.220p.

7. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry/V. Yu. Scherban, OZ Kolisko, MI Sholudko, V. Yu. Kalashnik.-K.: Education of Ukraine, 2017. - 745 p.

8. Scherban V.Y., Murza N.I., Kirichenko A.N., Sholudko M.I. Overall performance of compensators of the filament of knitted cars. Herald of Khmelnytskyi National University.2017. 245(1).pp.83-86.

9. Equalizations of dynamics of filament interactive with surface/V. Scherban, G. Melnik, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sheludko//Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada.6(1).pp.22-26.

10. Scherban V.Y.,.Murza N.I, Kirichenko A.N., Sholudko M.I. Comparativec analysis of work of natyazhiteley of filament of textile machines. Herald of Khmelnytskyi National University.2016.243(6).pp.18-21.

11. Scherban V. Basic parameters of curvature and torsion of the deformable thread in contact with runner/ V. Scherban, N.Murza, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sholudko //Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada.10(2).pp.18-23.

12. Scherban V. Kinematics of threads cooperates with the guiding surfaces of arbitrary profile/ V. Scherban, N. Murza, O. Kolisko, M. Sheludko, I. Semenova //Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada.5(3).pp.23-27.

Надійшла / Paper received : 26.09.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik/support.htm

Підп. до друку 26.11.2020 р. Ум.друк.арк. 42,22 Обл.-вид.арк. 40,16
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63