ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2020

ВІСНИК
Хмельницького національного університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2020, Issue 6, Volume 291

Хмельницький

ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки

Затверджений як фахове видання категорії «Б»,
РІШЕННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ № 1643 ВІД 28.12.2019 та №409 від 17.03.2020

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

Хмельницький, 2020, № 6(291)

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

Члени редколегії

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 № 6 від 30.12.2020 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@khmnu.edu.ua
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

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

О.С. АНДРОЩУК, О.В. НАГРЕБЕЦЬКИЙ, В.С. ОРЛЕНКО, В.М. ЧЕШУН, А.І. КАТАЄВА
БАЗОВІ ОПЕРАЦІЇ АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ ШИФРІВ ЗСУВУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНТРОПІЙНОГО КОДУВАННЯ ХАФФМЕНА 7

Б. В. ІВАНІЩЕВ, А. В. КАПЛУНОВ, В.В. РУСІНОВ, А. М. ВОЛОКИТА
МЕТОД ПРИСКОРЕННЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ РЕПЛІКАЦІЇ В РОЗПОДІЛЕНОМУ СХОВИЩІ ДАНИХ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ДОВІРИ ДО ВУЗЛА 13

А.С. КАШТАЛЬЯН, О.С. САВЕНКО
КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ЗЛОВМИСНИКІВ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ЇХ ПОВЕДІНКОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ 22

П.М. ШПАТАР, О.В. ГРЕСЬ, В.В. КАЧУР, А.Я. ТОМУЛЕЦЬ
ДЕТЕКТУВАННЯ ПООДИНОКИХ ФОТОНІВ В КВАНТОВИХ КРИПТОГРАФІЧНИХ СИСТЕМАХ ... 28

В.М. ДЖУЛІЙ, І.В. МУЛЯР, В.С. ОРЛЕНКО, В.Ю. ТІТОВА, В.А. АНІКІН
СИМЕТРИЧНА КРИПТОСИСТЕМА З НЕЛІНІЙНИМ ШТФРУВАННЯМ ТА МОЖЛИВІСТЮ КОНТРОЛЮ ШИФРОТЕКСТУ З МЕТОЮ МАСКУВАННЯ 33

О.М. ШИНКАРУК, О.М. ЯШИНА, О.Г. ОНИШКО
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРОГРАМНИХ ВЕБ-СИСТЕМ ЗАСОБАМИ РОЗРОБКИ 39

Ю.Л. ТИХОНОВ
МІЖНАРОДНІ ПОКАЗНИКИ РІВНЯ ОСВІТИ 45

ЕКОЛОГІЯ

Є.Г. ДУДНИК
АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ НА ДЕНДРОФОРУ М. ВІННИЦІ 51

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

М. М. КОСІЮК, А. М. КОСІЮК, В. С. КРАВЧУК
ПРОЕКТУВАННЯ ОБОРОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРЯМКУ РУХУ 56

М.П. МАЗУР
РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КРУГЛОЇ РІЗАЛЬНОЇ ПЛАСТИНКИ ІЗ ПОЗИТИВНИМ ЗАДНІМ КУТОМ 62

Ю.С. СОКОЛАН, К.А. ПАРШЕНКО
АНАЛІЗ ЗМІН У НОРМУВАННІ ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ У ВІДПОВІДНОСТІ ІЗ ДЕРЖАВНИМИ БУДІВЕЛЬНИМИ НОРМАМИ 67

Н.О. КОСТЮК, А.І. ГОРДЄЄВ, О.А. ГОРДЄЄВ
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИВОДУ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ПОРШНЕВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ 73

О.Г. ТИМОЩУК, С.П. ЛІСЕВИЧ
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОГО РІВНЯ ДЕФОРМАЦІЇ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ 79

А.Р. СТАРИЙ, А.І. ГОРДЄЄВ
ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ У ВІБРАЦІЙНІЙ МАШИНІ ЗАНУРЕНИМ ПУЛЬСУЮЧИМ СТРУМЕНЕМ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТИНКАМИ 84

А.О. МЕЛЬНИЧЕНКО, М.М. РУБАНКА, В.П. МІСЯЦЬ, О.С. ПОЛІЩУК
УДОСКОНАЛЕННЯ МАШИНИ УММ-5 ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ 93

М.М. КОСІЮК, С.А. КОСТЮК
МАШИНА ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ЗОВНІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ 101

М.С. АГЕЄВ, І.В. ГРИЦУК, А.В. РУТКОВСЬКИЙ, А.Є.СОЛОВИХ, С.Є. КАТЕРИНИЧ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО ІОННОГО ВАКУУМНОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ У ПЛАЗМІ ПУЛЬСУЮЧОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ 107

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

А. Г. ТКАЧУК, А. А. ГУМЕНЮК, М. В. БОГДАНОВСЬКИЙ, О. М. БЕЗВЕСІЛЬНА
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ 116

О.Б. БУРИКІН, Ю.В. МАЛОГУЛКО, А.В. СИТНИК, В.А. ГРИНИК
ПІДВИЩЕННЯ СПОСТЕРЕЖНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЇВ SMART METERING ТА ПСЕВДОВИМІРЮВАНЬ 124

О.Я. ВОЛОШАНЮК, О.В.НЕЧИПОРЕНКО
СИНТЕЗ ПОДОБИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧОЮ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ 131

В.І. СТЕЦЮК, М.Ю. ВЛАСЮК
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН 141

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

А.С. КАШТАЛЬЯН, Д.А. МАКАРИШКІН, В. Г. РУБЦОВ, А.О. РУБЦОВА
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОШУКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ПОШКОДЖЕНЬ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ 146

Д.В. МИХАЛЕВСЬКИЙ, О.С. ГОРОДЕЦЬКА
ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ АЛГОРИТМІВ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ АБОНЕНТЬКИХ ПРИСТРОЇВ СТАНДАРТУ 802.11 151

Г.І. БАРИЛО, І.І. ГЕЛЬЖИНСЬКИЙ, Р.Л. ГОЛЯКА, Т.А. МАРУСЕНКОВА
СИГНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ 156

ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНОЇ, ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

A. TIKHOSOV, Y. BEREZOVSKIY, T. KUZMINA, S. PUTINTSEVA
OPTIMIZATION OF THE DECORTICATION STEMS OF RETTED STRAW OF BAST CROPS DEPENDING ON THEIR MOISTURE 161

Т.В. ЄЛІНА, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
ПРОЄКТУВАННЯ ВИРОБІВ ТРУБЧАСТОЇ ФОРМИ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРИКОТАЖУ 168

Т. О. КОЛЕСНИК, О. А. АНДРЕЄВА
ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДГОТОВЧИХ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕРГАМЕНТУ 175

О.М. КУНИК, А.С. НАГРЕБЕЛЬНА, Д.Г. САРІБЄКОВА
ТЕХНОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА ВЕРШКОВОГО МАСЛА 180

А.Я. ГАНЗЮК, Л.М. МАСЛО
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНТЕНСИФІКАТОРА НА СОРБЦІЮ ДИСПЕРСНИХ БАРВНИКІВ 185

Г.М. ТОКАР, А.І. РУБАНКА, Т. В. ЛУЦКЕР, Ю.В. ВЕСЕЛА, Н.В. ОСТАПЕНКО, М.В.КОЛОСНІЧЕНКО
АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇЇ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ 194

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ, О.К. КОПАЙГОРА, Д.П. ЗАІКІНА, В.І. НЕВІДІН
АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ЗАМОРОЖУВАНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ 199

Т.М. ЛИПСЬКИЙ, Н.В. ПЕРВАЯ, А.І. БАБИЧ
РОЗРОБЛЕННЯ ВЗУТТЯ В СТИЛІ ГРАНЖ 207

Н.М. БОРЩЕВСЬКА, Н.В. ПЕРВАЯ, М.В. ІВАСЕНКО
ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТУРНОГО НАНЕСЕННЯ ДЕКОРАТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ВИРОБИ ЗІ ШКІРИ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА 213

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Н.А. ОДЕГОВ, Ю.Б. ВЛАСОВ, Д,А. МЛАДИНОВ
АЛФАВИТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАВНОЙ ЭНЕРГИИ 217

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

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-7-12
УДК 004.056.5: 004.421.6:004.942

О.С. АНДРОЩУК, О.В. НАГРЕБЕЦЬКИЙ,
В.С. ОРЛЕНКО, В.М. ЧЕШУН
Хмельницький національний університет
А.І. КАТАЄВА
Донецький національний університет імені Василя Стуса

БАЗОВІ ОПЕРАЦІЇ АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ ШИФРІВ ЗСУВУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНТРОПІЙНОГО КОДУВАННЯ ХАФФМЕНА

В роботі представлено результати аналізу характерних особливостей способу підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування попередньою модифікацією вхідних даних із застуванням методів оптимального ентропійного нерівномірного кодування на прикладі шифрів зсуву, за результатами аналізу запропоновано математичну модель, в якій визначено основні форми представлення даних та функції операцій їх перетворення, що може бути використано для математичного моделювання процедур алгоритмічної реалізації комбінованого методу шифрування за зазначеним способом.

Ключові слова: захист інформації, алгоритм шифрування, криптостійкість, оптимальне кодування.

O.S. ANDROSHCHUK, O.V. NAHREBETSKYY,
V.S. ORLENKO, V.M. CHESHUN
Khmelnytskyi National University
A.I. KATAIEVA
Vasyl' Stus Donetsk National University

BASIC OPERATIONS OF SHIFT CODE FORMATION ALGORITHM USING HUFFMAN ENTROPY CODING

The complexity and relevance of the tasks of cryptographic protection of information in the context of the increased value of information resources in the cyberspace causes interest in improving existing encryption algorithms and developing new ones.

The paper presents the results of a study of the characteristic features of the method for increasing the cryptographic strength of encryption algorithms by modifying the input data using the methods of optimal entropy uneven coding using the example of Caesar replacement ciphers and optimal Huffman coding. Based on the results of the analysis, a mathematical model is proposed, which defines the main forms of data presentation and the functions of their transformation operations. The model provides for work with three types of code alphabets, changing which destroys the statistical dependencies of the occurrence of alphabet symbols in the text, which serves as the basis for increasing the cryptographic strength of the encryption algorithm. The main functions presented in the mathematical model are the functions of performing operations of forming the alphabet based on the text submitted to the encryption algorithm, determining the statistical characteristics of the text, optimal uneven coding of the text, generating a sequential binary code of the encoded text, determining the composition of the uniform alphabet for encrypting text encoded with Huffman codes, as well as operators of encryption and decryption of the transformed text using Caesar ciphers.

The proposed model is intended for mathematical modeling of algorithmic implementation procedures for a combined encryption method using methods of optimal entropy uneven coding, as well as for evaluating the efficiency and cryptanalysis of ciphers.

Key words: information security, encryption algorithm, cryptographic strength, optimal coding..

Вступ

В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій, постійного збільшення обсягів інформації в кіберпросторі і зростання її цінності, а також через появу нових загроз щодо її цілісності і конфіденційності надзвичайної актуальності набувають заходи кібербезпеки.

Одним із базових заходів кібербезпеки є криптографічний захист даних, про що свідчить поява і масштабне використання великої кількості методів та алгоритмів симетричного й асиметричного шифрування з різними функціональними можливостями і принципами дії (алгоритми DES-базовий, подвійний і потрійний DES, IDEA, ГОСТ 28147, Діффі-Хелмана, RSA, Blowfish, AES, HiSea тощо [1-7]) та спроби їх постійного вдосконалення з метою підвищення криптостійкості шифрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З метою підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування використовуються спеціальні методи теоретичного і експериментального характеру, що різняться за принципами реалізації та ефективністю [7].

Загальний аналіз методів підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування дозволяє виділити декілька основних підходів [6-17]:

- модифікація існуючих алгоритмів шифрування;
- багатократне застосування алгоритму шифрування;
- поєднання декількох криптографічних алгоритмів;
- застосування додаткових некриптографічних методів підготовки і завершальної обробки даних.

Прикладами модифікації алгоритмів шифрування для удосконалення їх за критерієм

криптостійкості шифрованого тексту є запропонована в [8] модифікація шифру гамування для підвищення ефективності захисту електронних документів та описана в [9] модифікація алгоритму шифрування даних Меркла-Хелмана з використанням простих чисел та операцій над ними спеціального вигляду.

Багатократне застосування алгоритму шифрування є класичним варіантом, відомим з реалізації подвійного і потрійного алгоритму DES [4], який продовжує широко використовуватися і дозволяє отримувати нові рішення на основі відомих (мультиопераційне багаторазове ковзне шифрування [10] тощо).

В роботі [11] описано метод гібридної криптографії AES-HMAC, який передбачає для покращення безпеки передачі даних поєднання послідовним застосуванням криптографічних алгоритмів AES і HMAC.

Окреме місце серед способів підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування займають методи, що базуються на застосуванні додаткових некриптографічних методів підготовки і завершальної обробки даних. Зокрема, дослідження [12] присвячене методу підвищення ентропії потокового шифрування за рахунок використання нових операцій криптоперетворення, синтезованих за критерієм строгого стійкого кодування. Автори роботи [13] описують метод оптимізації вихідного повідомлення за допомогою генетичного алгоритму підвищення криптостійкості алгоритму RSA (отримані показники статистичної безпеки є вищими за показники оригінального алгоритму на 1–3 %). В [14] описане дослідження можливості використання алгоритму циклічного надлишкового коду для підвищення стійкості криптосхеми ECIES.

В роботах [15,16] авторами досліджується спосіб підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування попередньою модифікацією вхідних даних із застуванням методів оптимального ентропійного нерівномірного кодування, в ході якого забезпечується не лише стиск вхідного тексту, а і досягається зміна складу алфавіту кодування тексту та порушення статистичних даних повторюваності символів, тобто, збільшення його ентропії. Для шифрування даних обрано один із найпростіших і найменш стійких до зламу криптографічних методів, відомий як шифр заміни із зсувом (шифр Цезаря), застосування якого в подібних задачах обґрунтовується наочністю демонстрації ефекту від використання алгоритмів попередньої підготовки даних для підвищення криптостійкості алгоритму шифрування [16,17], а засобом підвищення криптостійкості алгоритму шифрування визначено оптимальні нерівномірні коди (ОНК) Хаффмена як класичний метод ентропійного кодування даних, що дає стабільний оптимальний код на виході у відповідності до статистичних властивостей алфавіту вхідного тексту [16,18].

В роботі [15] наведені загальні принципи застосування ОНК Хаффмена для підвищення криптостійкості шифрів зсуву, робота [16] присвячена опису експерименту з практичного застосування зазначених принципів для шифрування даних. Хоча результати експерименту і підтверджують ефективність досліджуваних принципи застосування ОНК Хаффмена для підвищення криптостійкості шифрів зсуву, їх не можна вважати систематизованими і ґрунтовними для алгоритмічної реалізації методу шифрування.

Постановка проблеми

Для підтвердження ефективності апріорних гіпотез [15,16] щодо підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування попередньою модифікацією вхідних даних із застуванням методів оптимального ентропійного нерівномірного кодування, а також для забезпечення можливості алгоритмічної реалізації комбінованого методу шифрування, актуальності набуває задача визначення форм формалізованого та систематизованого опису даних, що використовуються алгоритмом, та операторів їх перетворення.

Викладення основного матеріалу

Основою для реалізації будь-якого алгоритму криптографічного шифрування є відкритий вхідний текст, що підлягає захисту. В ході дослідження відкритий вхідний текст ідентифікуємо як T_1 .

Відкритий вхідний текст T_1 складається з символів алфавіту, який утворює собою множину символів, представлених примітивними рівномірними кодами. Для відображення первинного алфавіту введемо до математичної моделі опису даних множину S_1:

$S_1 : \{s_{1.1}, s_{1.2}, \ldots, s_{1.i}, \ldots, s_{1.k}\}$ – множина кодів символів первинного алфавіту вхідного тексту T_1.

На основі алфавіту S_1 первинний текст T_1 можна представити множиною кодів символів алфавіту $s_{1.i} \in S_1$:

$T_1 : \{s_{1.k}, s_{1.f}, \ldots, s_{1.i}, \ldots, s_{1.k}, \ldots, s_{1.f}, \ldots, s_{1.f}, s_{1.j}\}$ – представлення первинного тексту як упорядкованої за характером тексту множини кодів символів алфавіту $s_{1.i} \in S_1$ з апріорною повторюваністю кодів.

Для формування ОНК Хаффмена з мінімальною надлишковістю склад алфавіту T_1 і статистичні характеристики символів $s_{1.i} \in S_1$ визначаються на підставі аналізу самого вхідного тексту T_1. Таким чином, основою для реалізації цього методу кодування є відкритий вхідний текст як T_1, на основі якого формуються два описи статистичних характеристик:

- алфавіт S_1 кодів символів $s_{1.i}$ відкритого вхідного тексту T_1;
- статистичні характеристики частоти входження кодів символів $s_{1.i}$ алфавіту S_1 в текст T_1.

Оскільки коди символів певного формованого з тексту алфавіту S_x можуть повторюватися в аналізованому тексті T_x по декілька разів, для формування цільового алфавіту S_x визначимо функцію усунення дублювання кодів символів F_{RD} (RD – скорочення від Remove Duplicates), що формує алфавіт використаних в тексті T_x символів S_x на підставі обробки самого тексту T_x:

$$F_{\mathrm{RD}}\left(T_x\right) : S_x = \left\{ s_{x.i} \in T_x \,\middle|\, s_{x.1} \in T_x \vee \left(s_{x.i} \in T_x \wedge \left(\prod_{j=1}^{i-1} \left(s_{x.i} \oplus s_{x.j} \right) \right) > 0 \right) \right\} . \quad (1)$$

За функцією (1) до алфавіту S_x включається код першого символу тексту $s_{x.1} \in T_x$, після чого код кожного наступного символу $s_{x.i} \in T_x$ порівнюється з усіма символами тексту $s_{x.j} \in T_x$ (для $j<i$) і, якщо збігів не виявляється (код символу зустрічається вперше), то код $s_{x.i} \in T_x$ також додається до алфавіту S_x. Функція (1) представлена в узагальненому вигляді для тексту T_x і може бути використана для будь-якого кодованого двійковими кодами тексту, в тому числі і для первинного тексту T_1 на етапі формування первинного алфавіту S_1.

Для накопичення даних статистичних характеристик частоти входження символів $s_{1.i}$ алфавіту S_1 в текст T_1 використовується множина P_1:

P_1 : $\{p(s_{1.1}), p(s_{1.2}), \ldots, p(s_{1.i}), \ldots, p(s_{1.k})\}$ – статистичні частоти входження символів $s_{1.i}$ первинного алфавіту S_1 в текст T_1 (ймовірності появи символів алфавіту $s_{1.i} \in S_1$ в тексті T_1).

Визначення характеристик статистичних імовірностей $p(s_{x.i}) \in P_x$ появи символів алфавіту $s_{x.i} \in S_x$ в тексті T_x реалізуємо за функцією F_P:

$$F_P\left(T_x\right): P_x = \left\{1 - \frac{\left|T_x \cap \{s_{x.i}\}\right|}{\left|T_x\right|} \middle| s_{x.i} \in T_x\right\}. \tag{2}$$

Дані характеристик первинного вхідного тексту T_1, відображених множинами кодів символів первинного алфавіту S_1 і ймовірностей появи символів алфавіту P_1, є достатніми для реалізації процедури оптимального нерівномірного кодування Хаффмена. Результатом процедури кодування стає отримання вторинного алфавіту для кодування первинного вхідного тексту T_1, що дозволяє отримати вторинне представлення $T_{\text{ОНК}}$ вхідного тексту з аналогічною кількістю елементів (тобто, потужності множин T_1 і $T_{\text{ОНК}}$ залишаються однаковими: $|T_1|=|T_{\text{ОНК}}|$), але з властивостями нерівномірності коду елементів множини, що і забезпечує оптимізацію коду вхідного тексту (стиск коду тексту).

Для відображення вторинного алфавіту і можливості опису з його застосуванням тексту $T_{\text{ОНК}}$ застосовується множина S_2:

S_2 : $\{s_{2.1}, s_{1.2}, \ldots, s_{2.i}, \ldots, s_{2.k}\}$ – множина кодів символів вторинного алфавіту (алфавіту оптимального коду).

Особливістю ОНК Хаффмена є те, що для визначення оптимального нерівномірного коду $s_{2.i} \in S_2$ для будь-якого символу первинного алфавіту $s_{1.i} \in S_1$ це кодування потребує наявності статистичних даних (як базису оцінки ентропії) первинного алфавіту S_1 в цілому, а не окремих його символів. Тобто, операцію визначення складу алфавіту оптимального нерівномірного коду Хаффмена $S_{\text{НС}}$ (НС – скорочення від Huffman Coding) для символу первинного алфавіту S_x можна в узагальненому вигляді записати алгоритмічною функцією кодування Хаффмена, що враховує властивості символів $s_{x.i} \in S_x$ у взаємозв'язку статистичних даних множини P_x всіх елементів множини S_x:

$$F_{\text{НС}}\left(S_x, P_x\right): S_{\text{НС}x} = \left\{F_{\text{НС}}\left(s_{x.i}, P_x\right) \to s_{\text{НС}.i} \middle| s_{x.i} \in S_x\right\} \tag{3}$$

де $F_{\text{НС}}\left(s_{x.i}, P_x\right) \to s_{\text{НС}.i}$ – алгоритмічна функція визначення ОНК символу $s_{x.i} \in S_x$ з використанням статистичних даних множини P_x.

Призначення кодованого нерівномірними кодами алфавіту S_2 – перетворення первинного тексту T_1 в оптимізований із застосуванням ОНК Хаффмена вторинний текст $T_{\text{НС}}$, який також можна представити як упорядковану за характером тексту множину кодів символів алфавіту $s_{2.i} \in S_2$:

$T_{\text{НС}}$: $\{s_{2.\text{k}}, s_{2.\text{f}}, \ldots, s_{2.i}, \ldots, s_{2.\text{k}}, \ldots, s_{2.\text{f}}, \ldots, s_{2.\text{f}}, s_{2.j}\}$ – представлення вторинного тексту $T_{\text{НС}}$ як упорядкованої за характером тексту множини нерівномірних кодів символів алфавіту $s_{2.i} \in S_2$ з апріорною повторюваністю кодів.

Операцію заміни символу $s_{1.i} \in S_1$ в тексті T_1 на оптимальний код $s_{2.i} \in S_2$, що дозволяє отримати оптимальний код всього тексту $T_{\text{НС}}$, можна описати як узагальнену операцію заміни в закодованому тексті T_x, кодів символів одного алфавіту S_x, що використовувався для кодувався тексту T_x, на символи іншого алфавіту S_y. Тобто, мова йде про реалізацію перекодування тексту T_x із заміною кодів символів одного алфавіту S_x на коди символів одного алфавіту S_y, що дає нам нове представлення тексту T_y. Функція перекодування $F_{\text{ТС}}$ (ТС – скорочення від TransCoding):

$$F_{\text{ТС}}\left(T_x, S_x, S_y\right): T_y = \left\{s_{y.j} \in T_y = s_{y.i} \in S_y \middle| s_{x.j} \in T_x = s_{x.i} \in S_x\right\}. \tag{4}$$

Наступним кроком кодових перетворень при реалізації способу формування шифрів зсуву із застосуванням ОНК Хаффмена є переведення оптимального нерівномірного коду тексту $T_{\text{НС}}$ в рівномірні кодові комбінації для застосування шифрів зсуву. Переведення оптимального нерівномірного коду тексту $T_{\text{НС}}$ в рівномірні кодові комбінації передбачає виконання двох операцій з бітовими кодами [16]:

- перетворення закодованого ОНК Хаффмена тексту $T_{\text{НС}}$ в нерозривне послідовне повідомлення (потокове представлення двійкового коду тексту $T_{\text{НС}}$);

- дроблення потокового представлення тексту на рівномірні кодові комбінації у відповідності до потреб алгоритму (засобів) реалізації шифрів зсуву.

Функцію послідовного поєднання кодів $s_{j.i} \in S_j$ і $s_{j.f} \in S_j$ ідентифікуємо як F_{SC} (SC – скорочення від Sequential Combination):

$$F_{\mathrm{SC}}\left(T_x\right): T_{\mathrm{SC}x} = \sum_{i=1}^{|T_x|}\left(s_{x.i}\right)_{\mathrm{str}} . \tag{5}$$

де сума $\sum_{i=1}^{|T_x|}\left(s_{x.i}\right)_{\mathrm{str}}$ використовується як засіб поєднання кодів символів тексту в єдиний послідовний код і виконується як операція додавання символьних даних, а не цифрових.

Застосування функції (5) для всіх елементів $s_{2.i} \in T_2$ дає можливість виконати перетворення оптимального нерівномірного коду Хаффмена тексту T_{HC} в нерозривне послідовне повідомлення T_{SC2}.

Пропорційне розбиття (дроблення) потокового представлення тексту $T_{\mathrm{SC}x}$ на рівномірні кодові комбінації у відповідності до потреб алгоритму реалізації шифрів зсуву представлено як реалізацію функції F_{PD} (PD – скорочення від Proportional Division) розбиття бітової послідовності $T_{\mathrm{SC}x}$ на рівномірні кодові комбінації розрядності r з утворенням розподіленого рівномірного коду T_{UC} (UC – скорочення від Uniform Code):

$$F_{\mathrm{PD}}\left(T_{\mathrm{SC}x}, r\right): T_{\mathrm{UC}} = \left\{ s_{\mathrm{UC}.i} \left\| s_{\mathrm{UC}.i} \right| = r \wedge T_{\mathrm{SC}x} = \sum_{i=1}^{|T_{\mathrm{UC}}|}\left(s_{\mathrm{UC}.i}\right)_{\mathrm{str}} \right\}. \tag{6}$$

Використання в умові функції (6), поряд з вимогою щодо фіксованої розрядності $\left|s_{\mathrm{UC}.i}\right| = r$ елементів $s_{\mathrm{UC}.i} \in T_{\mathrm{UC}}$, функції послідовного поєднання кодів (5) стосовно генерованого тексту T_{UC} вказує на необхідності дотримання зворотності перетворень $T_{\mathrm{SC}x}$ в T_{UC} функцією (6) і T_{UC} в $T_{\mathrm{SC}x}$ функцією (5):

$$F_{\mathrm{SC}}\left(F_{\mathrm{PD}}\left(T_{\mathrm{SC}x}, r\right)\right) = T_{\mathrm{SC}x} . \tag{7}$$

Результатом застосування функції (6) до послідовного двійкового коду тексту T_{SC2} є представлення тексту T_{UC} як множини символів нового алфавіту S_3:

S_3 : $\{s_{3.1}, s_{3.2}, \ldots, s_{3.i}, \ldots, s_{3.n}\}$ – множина рівномірних кодів третинного алфавіту оптимального коду вхідного тексту.

Склад кодового алфавіту S_3 визначається застосуванням функції усунення дублювання кодів (1) символів стосовно кодованого представлення тексту T_{UC}. Характерною особливістю алфавіту S_3 порівняно до алфавіту S_1 і S_2 є порушення статистичних характеристик частоти появи кодів в текстах і, як правило, оновлення набору кодів символів. Оновлення складу наборів кодів може досягатися як через безпосередню зміну кількості кодових комбінацій нового алфавіту відносно початкового, так і в результаті застосування різних довжин кодових комбінацій рівномірних кодів алфавітів S_3 порівняно до алфавіту S_1.

За аналогією з попередніми описами, оптимізований текст T_{UC} можна представити як множину кодів символів алфавіту S_3:

T_{UC} : $\{s_{3.h}, s_{3.\mathrm{u}}, \ldots, s_{3.j}, \ldots, s_{3.l}, \ldots, s_{3.\mathrm{f}}, \ldots, s_{3.j}, \ldots, s_{3.x}\}$ – представлення тексту T_{UC} як упорядкованої множини символів алфавіту $s_{3.j} \in S_3$ з апріорно наявними повторами кодів.

Третинний алфавіт є цільовим для забезпечення можливості застосування шифрів зсуву щодо оптимального коду T_{UC} вхідного тексту T_1. Таким чином, на даному етапі відбувається перехід від оптимального кодування Хаффмена до застосування шифрів зсуву.

Формування шифрів зсуву тексту T_x на основі алфавіту $s_{3.j} \in S_x$ і ключа шифрування w виконується класичним методом [1,16,17,20], що, на основі оператора перекодування (4), може бути представлено як функція шифрування перекодуванням T_x із застосуванням циклічно зміщеного на w позицій алфавіту S_x:

$$F_{\mathrm{E}w}\left(T_x, S_x, w\right): T_{\mathrm{E}x} = \left\{ s_{\mathrm{E}x.j} \in T_{\mathrm{E}x} = s_{x.(i+w)\bmod|S_x|} \in S_x \left| s_{x.j} \in T_x = s_{x.i} \in S_x \right. \right\} . \tag{8}$$

Застосування функції (8) до оптимального коду T_{UC} вхідного тексту T_1 дає в результаті шифрований текст T_{E1} з підвищеною криптостійкістю, що досягається через усунення застосуванням ОНК Хаффмена основного недоліку шифрів зсуву – незмінності статистичних властивостей первинного алфавіту в алфавіті шифрування.

Дешифрування зашифрованого $T_{\mathrm{E}x}$ також виконується за класичним методом і описується функцією:

$$F_{\mathrm{D}w}\left(T_{\mathrm{E}x}, S_x, w\right): T_x = \left\{ s_{x.j} \in T_x = s_{x.(i-w)\bmod|S_x|} \in S_x \left| s_{x.j} \in T_x = s_{x.i} \in S_x \right. \right\} . \tag{9}$$

За формулою (9) з зашифрованого тексту T_{E1} відбувається відтворення оптимізованого тексту T_{UC}, який є базовим для виконання зворотних перетворень і відтворення відкритого вхідного тексту як T_1 (із застосуванням класичного варіанту реалізації алгоритму декодування ОНК Хаффмена).

Висновки

В роботі визначено основні форми представлення даних та функції операцій їх перетворення, орієнтовані на спосіб реалізації шифрів зсуву з підвищення криптостійкості алгоритмів шифрування попередньою модифікацією вхідних даних із застуванням методів оптимального ентропійного нерівномірного кодування Хаффмена, а також призначені для математичного моделювання процедур алгоритмічної реалізації комбінованого методу шифрування за зазначеним способом.

Література

1. Харченко М. М. Методи шифрування даних / М. М. Харченко //Актуальні питання сучасної інформатики. – 2016. – №3. – С. 23-28.

2. Карпінський М. П. Криптографічний захист мережевих даних на основі асиметричних алгоритмів / М. П. Карпінський, Я. І. Кінах, І. М. Костевич // Матеріали X X наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 17-18 травня 2017 року. – Т. : ТНТУ, 2017. – С. 78.

3. Бичова І. В. Особливості криптографічного захисту ділової документації. / І. В. Бичова, В. В. Чередниченко // Перспективи управлінської діяльності суб'єктів господарювання в контексті економічної безпеки : матеріали міжнародного форуму з безпеки. – Черкаси, 2017. – С. 214-216.

4. A Survey on the Cryptographic Encryption Algorithms / Muhammad Faheem Mushtaq, Sapiee Jamel, Abdulkadir Hassan Disina, Zahraddeen A. Pindar, Nur Shafinaz Ahmad Shakir, Mustafa Mat Deris // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – November 2017. – 8(11). – P. 333-343.

5. Research on the Application of Cryptography on the Blockchain / Sheping Zhai, Yuanyuan Yang, Jing Li, Cheng Qiu, Jiangming Zhao // Journal of Physics. – IOP Publishing, 2019. – Conf. Series 1168 (2019) 032077. – P. 1–8.

6. Ільєнко А. Сучасні методи гомоморфного шифрування інформаційних ресурсів / Анна Ільєнко // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні : науково-технічний збірник. – 2015. – Вип. 2 (30). – С. 52-57.

7. Метьолкін А. О. Дослідження методів підвищення криптографічної стійкості / А. О. Метьолкін, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – № 6. – С. 90-95.

8. Розломій І.О. Підвищення ефективності захисту електронних документів модифікацією шифру гамування / І.О. Розломій // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 2. – С. 69-73.

9. Івохін Є. В. Про модифікацію алгоритму шифрування даних Меркла-Хелмана / Є. В. Івохін // Вісник ЧДТУ. –2014. – № 2. – С. 10–14.

10. Бабенко В.Г. Мультиопераційне багаторазове ковзне шифрування / В.Г. Бабенко, О.Г. Мельник, Р.П. Мельник // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 3(43). – С. 70–72.

11. Farah R.Shareef A novel crypto technique based ciphertext shifting / Farah R.Shareef // Egyptian Informatics Journal. – July 2020. – Volume 21, Issue 2.– P. 83-90.

12. Бабенко В. Г. Методологія синтезу операцій перетворення інформації для комп'ютерної криптографії : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 / Віра Григорівна Бабенко; Черкаський державний технологічний університет. – Черкаси, 2020. – 200 с.

13. Підвищення стійкості криптоалгоритму RSA за рахунок генетичної оптимізації вихідного повідомлення / А.В. Приймак, Ю.Є. Яремчук // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 76–84.

14. Приймак А. В. Дослідження можливості використання алгоритму циклічного надлишкового коду для підвищення стійкості криптосхеми ECIES / А. В. Приймак, О. В. Салієва, Я. Ю. Яремчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – № 1. – С. 155-162.

15. Оптимальне нерівномірне кодування в підвищенні криптостійкості шифрів / В. М. Чешун, В. С. Орленко, В. К. Шваб, Р. М. Гончар, С. М. Халіманенко // Тези доповідей XVI Міжнародної науково-практичної конференції "Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє". – Київ : ВІКНУ, 2020. – Т. 1. – С. 65–66.

16. Гончар Р. М. Оптимальне кодування як засіб підвищення захищеності передачі шифрованих даних / Р. М. Гончар, О. В. Нагребецький, В. С. Орленко, В. М. Чешун // Збірник наукових праць молодих науковців і студентів «Інтелектуальний потенціал – 2020». – Хмельницький : ПВНЗ УЕП, 2020. – Ч. 2. – С. 26–34.

17. Atish J. Enhancing the Security of Caesar Cipher Substitution Method using a Randomized Approach for more Secure Communication / Atish Jain, Ronak Dedhia, Abhijit Patil // International Journal of Computer Applications (0975-8887). – November 2015. – Volume 129. – №13. – P. 6-11.

18. Кодування джерел інформації та каналів зв'язку: навчальний посібник / [Беркман Л.Н., Бондарчук А.П., Гайдур Г.І., Чумак Н.С.]. – Київ: ННІТІ ДУТ, 2018. – 91 с.

19. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинінін, С. В. Толюпа. - Київ : Логос, 2018. - 227 с.

20. Прикладна криптологія : системи шифрування : підручник / О. Г. Корченко, В. П. Сіденко, Ю. О. Дрейс. – К. : ДУТ, 2014. – 448 с.

21. Приймак А. В. Підвищення криптостійкості симетричного шифру шляхом використання генетичного алгоритму / А. В. Приймак // Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ. – Вінниця, 14-23 березня 2018 р. – 2018. – С.99-102.

Referenses

1. Kharchenko M. M. Metody shyfruvannja danykh / M. M. Kharchenko //Aktualjni pytannja suchasnoji informatyky. – 2016. – №3. – S. 23-28.

2. Karpinsjkyj M. P. Kryptoghrafichnyj zakhyst merezhevykh danykh na osnovi asymetrychnykh alghorytmiv / M. P. Karpinsjkyj, Ja. I. Kinakh, I. M. Kostevych // Materialy X X naukovoji konferenciji TNTU im. I. Puljuja, 17-18 travnja 2017 roku. – T. : TNTU, 2017. – S. 78.

3. Bychova I. V. Osoblyvosti kryptoghrafichnogho zakhystu dilovoji dokumentaciji. / I. V. Bychova, V. V. Cherednychenko // Perspektyvy upravlinsjkoji dijaljnosti sub'jektiv ghospodarjuvannja v konteksti ekonomichnoji bezpeky : materialy mizhnarodnogho forumu z bezpeky. – Cherkasy, 2017. – S. 214-216.

4. A Survey on the Cryptographic Encryption Algorithms / Muhammad Faheem Mushtaq, Sapiee Jamel, Abdulkadir Hassan Disina, Zahraddeen A. Pindar, Nur Shafinaz Ahmad Shakir, Mustafa Mat Deris // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – November 2017. – 8(11). – P. 333-343.

5. Research on the Application of Cryptography on the Blockchain / Sheping Zhai, Yuanyuan Yang, Jing Li, Cheng Qiu, Jiangming Zhao // Journal of Physics. ¬– IOP Publishing, 2019. – Conf. Series 1168 (2019) 032077. – P. 1–8.

6. Iljjenko A. Suchasni metody ghomomorfnogho shyfruvannja informacijnykh resursiv / Anna Iljjenko // Pravove, normatyvne ta metrologhichne zabezpechennja systemy zakhystu informaciji v Ukrajini : naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. – 2015. – Vyp. 2 (30). – S. 52-57.

7. Metjolkin A. O. Doslidzhennja metodiv pidvyshhennja kryptoghrafichnoji stijkosti / A. O. Metjolkin, V. S. Kardashuk // Visnyk Skhidnoukrajinsjkogho nacionaljnogho universytetu imeni Volodymyra Dalja. – 2018. – № 6. – S. 90-95.

8. Rozlomij I.O. Pidvyshhennja efektyvnosti zakhystu elektronnykh dokumentiv modyfikacijeju shyfru ghamuvannja / I.O. Rozlomij // "Herald of Khmelnytskyi national university", №2, 2016r. - Technical sciences. – Khmelnytskyi: KhNU. – S. 69-73.

9. Ivokhin Je. V. Pro modyfikaciju alghorytmu shyfruvannja danykh Merkla-Khelmana / Je. V. Ivokhin // Visnyk ChDTU. –2014. – № 2. – S. 10–14.

10. Babenko V.Gh. Muljtyoperacijne baghatorazove kovzne shyfruvannja / V.Gh. Babenko, O.Gh. Meljnyk, R.P. Meljnyk // Systemy ozbrojennja i vijsjkova tekhnika. – 2015. – № 3(43). – S. 70–72.

11. Farah R.Shareef A novel crypto technique based ciphertext shifting / Farah R.Shareef // Egyptian Informatics Journal. – July 2020. – Volume 21, Issue 2.– P. 83-90.

12. Babenko V. Gh. Metodologhija syntezu operacij peretvorennja informaciji dlja komp'juternoji kryptoghrafiji : dys. ... d-ra tekhn. Nauk : 05.13.05 / Vira Ghryghorivna Babenko; Cherkasjkyj derzhavnyj tekhnologhichnyj universytet. – Cherkasy, 2020. – 200 s.

13. Pidvyshhennja stijkosti kryptoalghorytmu RSA za rakhunok ghenetychnoji optymizaciji vykhidnogho povidom¬lennja / A.V. Pryjmak, Ju.Je. Jaremchuk // Rejestracija, zberighannja i obrobka danykh. – 2018. – T. 20, № 4. – S. 76–84.

14. Pryjmak A. V. Doslidzhennja mozhlyvosti vykorystannja alghorytmu cyklichnogho nadlyshkovogho kodu dlja pidvyshhennja stijkosti kryptoskhemy ECIES / A. V. Pryjmak, O. V. Salijeva, Ja. Ju. Jaremchuk // "Herald of Khmelnytskyi national university", №1, 2019r. - Technical sciences. – Khmelnytskyi: KhNU. – S. 155-162.

15. Optymaljne nerivnomirne koduvannja v pidvyshhenni kryptostijkosti shyfriv / V. M. Cheshun, V. S. Orlenko, V. K. Shvab, R. M. Ghonchar, S. M. Khalimanenko // Tezy dopovidej KhVI Mizhnarodnoji naukovo-praktychnoji konferenciji "Vijsjkova osvita i nauka: sjoghodennja ta majbutnje". – Kyjiv : VIKNU, 2020. – T. 1. – S. 65–66.

16. Ghonchar R. M. Optymaljne koduvannja jak zasib pidvyshhennja zakhyshhenosti peredachi shyfrovanykh danykh / R. M. Ghonchar, O. V. Naghrebecjkyj, V. S. Orlenko, V. M. Cheshun // Zbirnyk naukovykh pracj molodykh naukovciv i studentiv «Intelektualjnyj potencial – 2020». – Khmeljnycjkyj : PVNZ UEP, 2020. – Ch. 2. – S. 26–34.

17. Atish J. Enhancing the Security of Caesar Cipher Substitution Method using a Randomized Approach for more Secure Communication / Atish Jain, Ronak Dedhia, Abhijit Patil // International Journal of Computer Applications (0975-8887). – November 2015. – Volume 129. – №13. – R. 6-11.

18. Koduvannja dzherel informaciji ta kanaliv zv'jazku: navchaljnyj posibnyk / [Berkman L.N., Bondarchuk A.P., Ghajdur Gh.I., Chumak N.S.]. – Kyjiv: NNITI DUT, 2018. – 91 s.

19. Bojko Ju. M. Teoretychni aspekty pidvyshhennja zavadostijkosti j efektyvnosti obrobky syghnaliv v radiotekhnichnykh prystrojakh ta zasobakh telekomunikacijnykh system za najavnosti zavad : monoghrafija / Ju. M. Bojko, V. A. Druzhyninin, S. V. Toljupa. - Kyjiv : Loghos, 2018. - 227 s.

20. Prykladna kryptologhija : systemy shyfruvannja : pidruchnyk / O. Gh. Korchenko, V. P. Sidenko, Ju. O. Drejs. – K. : DUT, 2014. – 448 s.

21. Pryjmak A. V. Pidvyshhennja kryptostijkosti symetrychnogho shyfru shljakhom vykorystannja ghenetychnogho alghorytmu / A. V. Pryjmak // Materialy XLVII naukovo-tekhnichnoji konferenciji pidrozdiliv VNTU. – Vinnycja, 14-23 bereznja 2018 r. – 2018. – S.99-102.

Надійшла / Paper received : 24.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-13-21
УДК 004.75

Б. В. ІВАНІЩЕВ, А. В. КАПЛУНОВ, В.В. РУСІНОВ, А. М. ВОЛОКИТА
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

МЕТОД ПРИСКОРЕННЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ РЕПЛІКАЦІЇ В РОЗПОДІЛЕНОМУ СХОВИЩІ ДАНИХ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ДОВІРИ ДО ВУЗЛА

У цій роботі розглянуто проблему відновлення коефіцієнту реплікації в масштабованих розподілених сховищах при відключенні вузлів. Проведено аналіз open source механізму моніторингу. Запропоновано метод оцінки ступеня довіри до вузла, на базі оцінки метрик і виділення найбільш важливих їх типів. Запропоновано алгоритм складання плану міграції з вузлів з низьким ступенем довіри, оптимальний за критерієм часу відновлення коефіцієнту реплікації. Проведена експериментальна оцінка запропонованого методу.

Ключові слова: розподілене сховище даних, моніторинг, ступінь довіри, коефіцієнт реплікації, міграція даних.

B. V. IVANISHCHEV, A. V. KAPLUNOV, V.V. RUSINOV, A. M. VOLOKYTA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHOD OF ACCELERATING REPLICATION RATIO RENEWAL IN DISTRIBUTED DATA STORAGE BASED ON THE NODE'S TRUST LEVEL MONITORING

Considering the collective nature of the functioning of distributed computing systems the necessary mechanism for ensuring the quality of service is automatic dispatching, which is a set of control actions that optimize the operation of the entire system as a whole, carrying out operational planning and redistribution of running tasks based on the current state of the system. Further, progress of distributed computing systems will lead to a manifold increase in the number of resources and their diversity, which will lead to an aggravation of the existing problem.

The monitoring mechanism allows you to track changes in the state of system components, however, predicting the occurrence of emergency situations requires the implementation of a method for assessing the degree of trust in a node. A method of assessment based on assessing metrics and identifying their most important types is proposed. With the combination of these mechanisms, the need to reconfigure the storage becomes more transparent, which allows data balancing procedure to be performed even before the emergency shutdown of a problem node.

A method for drawing up a data migration plan with polynomial computational complexity was proposed which is based on allocating part of nodes into a separate subgraph and creating a migration plan for that subgraph firstly. The proposed method has been proven to be optimal in terms of migration time of data elements from nodes that are marked by the monitoring system as potentially unreliable. Optimization of the migration method by this criterion makes it possible to reduce the replication ratio recovery time in distributed storage by increasing total time of migration.

In this regard, the use of a storage reconfiguration mechanism based on an assessment of the degree of trust in a node is an urgent topic that is of scientific and practical interest. It has been shown experimentally that the proposed method is equally effective for distributed storages with a different number of storage devices and a different number of data items.

Keywords: distributed data storage, monitoring, level of trust, replication ratio, data migration

Постановка задачі

На сьогодні обсяг інформації, який генерується та використовується у світі, має стійку тенденцію до зростання. Це потребує постійного зростання обсягів сховищ даних, що можливо тільки коштом використання розподілених систем зберігання. Використання розподілених сховищ підіймає ряд питань, пов'язаних з надійністю зберігання даних і можливістю швидкого масштабування.

Сучасні розподілені сховища даних в більшості засновані на хмарній інфраструктурі IaaS (Infrastructure as a Service). Така інфраструктура дозволяє, не обмежуючись фіксованою кількістю пристроїв зберігання, тимчасово орендувати додаткові пристрої при необхідності. Та навпаки, звільняти пристрої, коли необхідність в них відпала. Також кількість пристроїв, що використовуються у розподіленому сховищі може зменшуватись при аварійному відключенні або деградації окремих пристроїв зберігання або частин мережі, які їх з'єднують.

Потреба в надійному зберіганні даних вирішується за допомогою зберігання в розподіленому сховищі декількох копій окремих елементів даних одночасно на різних пристроях зберігання, тобто шляхом реплікації даних. При цьому кількість копій кожного елементу даних в сховищі називається коефіцієнтом реплікації та має бути постійною у часі величиною. При плановому чи аварійному зменшенні кількості вузлів в розподіленому сховищі відбувається втрата деякої кількості копій елементів даних, тобто миттєва величина коефіцієнту реплікації зменшується та потребує найшвидшого відновлення.

Вчасне реагування на зміну стану розподіленого сховища загалом та окремих його вузлів (пристроїв зберігання) надає можливість швидко відновити коефіцієнт реплікації даних у сховищі та є запорукою надійного зберігання даних та забезпечення постійної доступності цих даних для користувачів. Тому гостро постають питання моніторингу стану розподіленого сховища, детекції аварійних ситуацій та вчасного реагування на ці ситуації для запобігання втрати даних з розподіленого сховища. Механізм моніторингу дозволяє відстежувати зміну стану компонентів системи, проте прогнозування виникнення аварійних ситуацій вимагає реалізації методу оцінки ступеня довіри до вузла, на базі оцінки метрик підконтрольної

системи і виділення найбільш важливих їх типів. За допомогою сукупності наведених механізмів необхідність реконфігурації сховища стає більш прозорою, що дозволяє підвищити контроль за середою виконання.

Відновлення коефіцієнта реплікації в розподіленому сховищі відбувається шляхом проведення процедури балансування сховища. Процедура балансування даних складається з задач розміщення та міграції даних. На першому етапі процедури балансування визначається оптимальне розміщення даних на пристроях зберігання в поточний момент часу, що вирішується задачею розміщення. Вихідними даними цієї задачі є відображення, в якому кожному елементу даних зіставляються пристрої зберігання, на яких цей елемент повинен бути розміщений після балансування.

Визначивши нове розміщення даних, а також знаючи попереднє розміщення, можна побудувати мультиграф вимог G, який описує переміщення даних [1]. Цей мультиграф є направленим і ациклічним:

$$\begin{gathered} G=(V,E,P)\,E\subseteq V\times V \\ E\subseteq V\times V \\ P:E\to N \\ \forall v,\omega\in V\Rightarrow P(v,\omega)=0,\text{якщо}(v,\omega)\notin E, \end{gathered} \tag{1}$$

де V – пристрої зберігання,

E – процедури переміщення даних між пристроями зберігання,

P – вагова функція мультиграфу (вартість переміщення даних).

Оскільки всі елементи даних мають фіксований розмір та однаковий час передачі, то план міграції можна розбити на кроки однакової тривалості. Завдання міграції полягає в складанні плану переміщення даних між пристроями зберігання згідно мультиграфу вимог (1) з мінімальною кількістю кроків. У такому вигляді ця задача зводиться до задачі розфарбовування дуг мультиграфу. При цьому кількість кроків у оптимальному плані міграції повинна дорівнювати мінімальній кількості кольорів розфарбування дуг мультиграфу, тобто хроматичному індексу мультиграфа.

Задача міграції в масштабованому сховищі є окремим випадком задачі міграції та має кілька критеріїв оптимізації. Одним з критеріїв є час міграції елементів даних, коефіцієнт реплікації яких не дорівнює цільовому, тобто час міграції даних, копії яких знаходяться на пристроях зберігання, помічених підсистемою моніторингу як потенційно ненадійні. Оптимізація за цим критерієм дозволяє швидко відновити коефіцієнт реплікації сховища даних, підвищуючи надійність зберігання даних. Іншим критерієм є загальний час міграції всіх елементів даних.

У статті запропоновано метод прискорення відновлення коефіцієнту реплікації в розподіленому сховищі даних, який використовує запропонований алгоритм міграції даних, що оптимізований за часом міграції з пристроїв, які помічені підсистемою моніторингу як потенційно ненадійні на основі оцінки рівня довіри до вузлів.

Аналіз досліджень та публікацій

Рішення для моніторингу вузлів. При виборі системи моніторингу розподіленої інфраструктури потрібно врахувати ряд факторів. В першу чергу оцінити відповідність функціоналу системи моніторингу вашим технічним і бізнес-вимогам, а також розглянути особливості розгортання та супроводу, щоб підібрати інструмент, що максимально відповідає вашій інфраструктурі.

Zabbix [2] - це універсальне рішення для моніторингу з відкритим вихідним кодом, що має підтримку технології єдиного входу, розподіленого моніторингу, Zabbix Insights (набір тригерних функцій для виявлення аномалій і неправильної поведінки системи), розширені налаштування для забезпечення безпеки, відсутність обмежень на зберігання даних і т.д. Zabbix сервер - центральний процес програмного забезпечення. Сервер виконує опитування даних, обчислює тригери, відправляє оповіщення користувачам. Він є центральним компонентом, якому агенти і проксі повідомляють дані про доступність і цілісність систем. Сервер може самостійно віддалено перевіряти мережеві служби (такі як веб-сервера і поштові сервери), використовуючи прості перевірки сервісів. Сервер є головним сховищем, в якому зберігаються всі конфігураційні, статистичні та оперативні дані, також він розсилає повідомлення адміністраторам в разі виникнення проблем з будь-яким з підконтрольних систем.

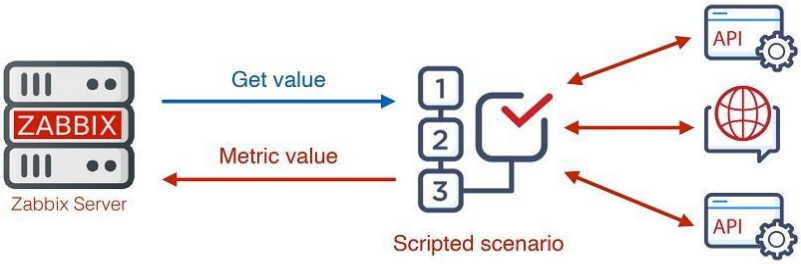


Рис. 1. Zabbix-сценарій комплексного багатоступеневого збору даних [2]

Агенти розгортаються на підконтрольних цілях для активного моніторингу локальних ресурсів і додатків (статистика жорстких дисків, пам'яті, процесорів і т.д.). Агент локально збирає оперативну інформацію і відправляє дані серверу для подальшої обробки. Ефективність агентів досягається завдяки використанню рідних системні виклики для збору інформації статистики. У разі проблем (таких як відсутність вільного місця на жорсткому диску або аварійного завершення процесу сервісу), сервер може швидко повідомити адміністраторів серверу, який повідомив про помилку.

Агенти можуть виконувати пасивні і активні перевірки. У разі пасивної перевірки агент відповідає на запит даних. сервер (або проксі) запитує дані, наприклад, завантаження CPU, і агент повертає результат. Активні перевірки вимагають більш складної обробки. Агент спочатку отримує список елементів даних для незалежної обробки від сервера. Далі він буде періодично відправляти нові значення сервера.

За рахунок використання рідних системних викликів, агенти дозволяють ефективно відстежувати зміни метрик підконтрольної системи, що є необхідною умовою використання методу оцінки ступеня довіри до вузла.

Алгоритми міграції даних. Задача розфарбовування дуг графа належить до класу NP-складних [3]. Алгоритми точного її рішення вимагають повного перебору і мають експоненціальну обчислювальну складність, тобто не є поліноміальними. Однак, також існують апроксимаційні поліноміальні алгоритми розв'язання цієї задачі.

У статті [4] описаний поліноміальний апроксимаційний алгоритм розфарбовування ребер графу з обчислювальною складністю O(A*(V+δ)), де A – множина дуг графу; V - множина вершин; δ - деяка константа. Цей алгоритм заснований на принципі “розділяй і володарюй”. Загальне рішення для всього графа вибудовується з об'єднання рішень для множини розфарбованих підграфів. На початку роботи алгоритму максимальний розмір підграфів обмежений невеликим числом. Дуги обираються послідовно в довільному порядку і формують нові підграфи або входять до складу вже відомих. При певних умовах нова дуга може об'єднати два підграфи в один. У процесі роботи алгоритму максимальний розмір підграфів поступово збільшується. Після проходу по всіх дугах розфарбовані підграфи об'єднуються в єдиний граф.

Задача розфарбування дуг дводольного графа є окремим випадком задачі розфарбування дуг, але вона не належить до класу NP-повних. У статті [5] можна знайти опис оптимального алгоритму розфарбовування дуг з обчислювальною складністю O(A*logD), де A – множина дуг; D – максимальний ступінь вершин графу. В разі простого, дводольного графа можна визначити правила додавання дуг до тих чи інших підграфів і правила об'єднання підграфів, які дозволяють формувати гарантовано оптимальне розфарбування дуг на кожному кроці алгоритму.

У статті [6] приведено спосіб, який дозволяє зменшити час міграції даних з пристроїв зберігання, які додаються або від'єднуються від сховища під час масштабування, шляхом збільшення загального часу міграції даних. В цьому способі серед множини пристроїв зберігання, що входять до складу масштабованого розподіленого сховища, виділяється підмножина масштабуючих пристроїв зберігання S. До цієї підмножини відносяться пристрої, що на момент поточної процедури балансування додаються або звільняються зі сховища. Переміщення даних між двома масштабуючими пристроями зберігання під час процедури балансування даних не проводиться.

Під час масштабування необхідно виконати процедуру міграції на всіх масштабуючих пристроях S. Після цього їх можна звільнити та виконати міграцію на пристроях, що залишилися. Отже, процедуру міграції можна розділити на дві частини: масштабування та залишкову міграцію. Для вирішення подібних задач використовують розділення графу на підграфи. З огляду на це мультиграф вимог G (1) можна розділити на два підграфа: масштабуючий G_S і залишковий G_R.

Масштабуючим підграфом G_S є підграф мультиграфу вимог G, що складається з множини вершин S (масштабуючих пристроїв зберігання) і множини вершин S_{adj}, суміжних з S, а також всіх дуг, що з'єднують вершини S с S_{adj}:

$$\begin{gathered} Gs = (Vs, Es, P) \\ Vs \subseteq V, Vs = S \bigcup Sadj \\ Es \subseteq E \\ \upsilon \in Sadj \subseteq V \Leftrightarrow \exists \omega \in S, P(\upsilon, \omega) > 0 \\ (\upsilon, \omega) \in Es \Leftrightarrow \upsilon \in S, \omega \in Sadj, \\ P(\upsilon, \omega) > 0 \end{gathered} \tag{2}$$

Залишковим підграфом G_R є підграф графу вимог G, що складається з множини вершин і дуг графу G за винятком вершин S і дуг, що з'єднують вершини S і S_{adj}:

$$V_R \subseteq V, V_R = V\ , \quad S$$
$$E_R \subseteq E \tag{3}$$
$$(\upsilon,\omega) \in E_R \Leftrightarrow \upsilon,\omega \in V_R, P(\upsilon,\omega) > 0$$

Приклад поділу мультиграфу вимог на підграфи наведено на рисунку 2. Очевидно, що множина вершин S_{adj} належить як підграфу G_S так і підграфу G_R, згідно з їх визначеннями. Дуги, що з'єднують вершини S_{adj} між собою належіть тільки підграфу G_R.

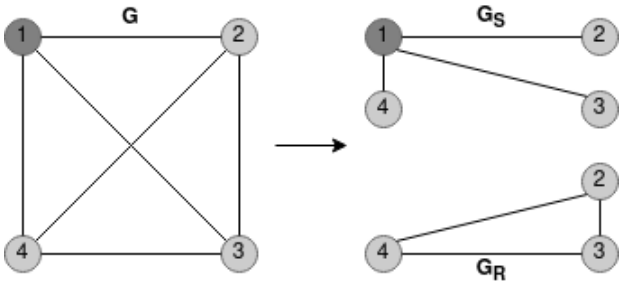


Рис. 2. Поділ графу вимог розподіленого масштабованого сховища даних G на два підграфа: G_S і G_R [6].

Виходячи з визначення масштабуючого підграфа (3) він складається з множини масштабуючих вершин S і множини суміжних з ними вершин S_{adj}. Вершини S не мають спільних дуг, так як це суперечить визначенню масштабуючих вершин, а вершини S_{adj} не мають спільних дуг, так як це суперечить визначенню масштабуючого підграфа (3). Отже, масштабуючий підграф G_S є дводольним графом з долями, що складаються з множини вершин S і S_{adj}.

Враховуючи, що підграф G_S дводольний, у статті [6] запропоновано наступний спосіб розв'язання задачі міграції та показано, що він має поліноміальну складність max{O(A*logD), O(A*(V+δ))}, де A – множина дуг, V – множина вершин, D – максимальна ступінь вершини, δ – деяка константа:

1. виділити підграф G_S з графу G на основі множини масштабуючих вершин S;
2. виділити підграф G_R з графу G на основі підграфу G_S;
3. використовувати алгоритм зі статті [5] для знаходження плану міграції для дводольного графу вимог G_S;
4. використовувати алгоритм зі статті [4] для знаходження плану міграції для графу вимог G_R;
5. отримати загальний план міграції для графу вимог G шляхом послідовного об'єднання планів міграції для підграфів G_S і G_R.

Модифікований метод оцінки ступеня довіри до вузлів

Базова роль системи моніторингу - це інформування про наближення стану компоненту до критичних значень. Візьмемо за основу наступний принцип взаємодії системи моніторингу з підконтрольною системою [7]:

$$S = \square\ O, P, L, M, f_p, f_u \square \tag{4}$$

де O – множина метрик підконтрольної системи; P – множина властивостей метрик підконтрольної системи; L – множина пов'язаних між собою метрик, що відображає залежність стабільного стану їх самих або їх властивостей один від одного; M – множина датчиків або способів аналізу системи моніторингу; f_p – функція, що відображає наявність певної метрики у компонента системи:

$$f_p = O \otimes P \rightarrow \{0,1\} \tag{5}$$

f_u – функція, яка відображає можливість використання конкретного датчика або методу аналізу для контролю стану даної метрики:

$$f_u = M \otimes P \rightarrow \{0,1\} \tag{6}$$

Ступінь однозначності стану підконтрольної системи може бути представлена як

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{c} w_{p_i} n_{p_i}}{\sum_{j=1}^{d} w_{p_j} n_{p_j}} \tag{7}$$

де p_i – метрики, підконтрольні системі моніторингу (тобто для яких існує $f_u(p_i, s) = 1$); p_j –

всі метрики підконтрольної системи (тобто для яких існує $f_p\left(o, p_i\right)=1$); w – внесок метрики в функціонування підконтрольної системи; n_p – число компонентів, що мають метрику p в підконтрольній системі.

Додамо додатковий критерій при оцінці якості моніторингу - середню інформативність повідомлення про стан підконтрольної системи за певний період часу. Для вирішення цього завдання використаємо стандартні засоби системи моніторингу Zabbix.

Нижче представлені виділені класи по ступеню інформативності повідомлень (наведені приклади реальних повідомлень для кожного класу):

0. Повідомлення про відсутність компонента системи або не містить інформативної діагностичної інформації:

Switch 1 - WS-C2960S-48LPD-L - Power Supply 0: Device has been replaced (new serial number received)

1. Повідомлення пов'язані з неправильним налаштуванням компонентів системи:

Interface Fa0/4(ucsfi1-A.cr8.p16a.kiev.mgmt (mgmt_if)): In half-duplex mode

2. Повідомлення про загальну недоступність компонента:

Unavailable by ICMP ping

3. Повідомлення про загальну непрацездатність певної локалізованої складової частини компонента:

Interface Gi0/2(): Link down

4. Повідомлення містить інформацію тільки про факт невідповідності значення критерію:

Sw1, PS1 Normal, RPS NotExist: Power supply is in critical state

5. Повідомлення містить поточне значення параметра:

#1: High CPU utilization (over 90% for 5m)

Кожному повідомленню присвоюється певна інформаційна вага від 0 (для повідомлень категорії 0) до 1 (для повідомлень категорії 5) відповідно до її внеску в систему оцінювання стану системи.

Після розподілу ваги I_{aver} розраховується за формулою:

$$I_{Aver}=\frac{\sum_{i=1}^{k} I_{m_i}}{k} \tag{8}$$

де I_m – інформаційна вага повідомлення m; k – число опитувань стану властивості m, здійснених системою за заданий період часу.

Для відображення різниці в інформаційній вазі різних повідомлень і сенсорів (методів) їх оцінки, слід розширити область значення функції застосовності f_u:

$$f_u = M \otimes P \rightarrow \{0...1\} \tag{9}$$

де

$$f_u\left(s, p\right)=I_{Aver_{s,p}} \tag{10}$$

тобто значення функції для деякої пари властивості p і сенсора s визначається середньою інформативністю зміни метрики, зафіксованої способом аналізу або сенсором s в процесі моніторингу властивості p. Таким чином, в разі неможливості застосування способу аналізу або сенсора для контролю певної метрики, зібрані ним дані будуть належати до класу 0, і значення функції застосовності як і в початковому вигляді дорівнюватиме 0.

Таким чином:

$$E=\frac{\sum_{i=1}^{c} \Delta_{ep_i} w_{p_i} n_{p_i}}{\sum_{j=1}^{d} w_{p_j} n_{p_j}} \tag{11}$$

де f_{ep_i} - коефіцієнт інформативності, який визначається як значення функції застосовності методу аналізу або сенсору, що використовується системою для моніторингу властивості p_i.

Спосіб паралельного розрахунку плану міграції

Запропонований спосбі заснований на способі міграції даних, який представлений у статті [6]. В цьому способі використано заміну послідовного об’єднання двох планів міграції на їх паралельне об’єднання.

Під паралельним об’єднанням мається на увазі наступне: роздільне розфарбування підграфів G_S і G_R, як це робиться в первісному способі, та складання окремих планів міграції для цих підграфів, але при складанні загального плану міграції G для всіх пересилок на кожному кроці в плані міграції підграфа G_S

проводиться пошук таких пересилок даних в плані міграції підграфа G_R, щоб ці пересилки можна було об'єднати в один крок в загальному плані міграції мультиграфа G. Вважається, що пересилки можна об'єднати на одному кроці плану міграції, якщо на цьому кроці жоден з пристроїв зберігання не використовується більше одного разу як джерело або приймач пересилки даних.

Враховуючи це запропонований спосіб розв'язання задачі міграції даних виглядає так:

1. виділяється підграф G_S з мультиграфа G на основі множини пристроїв зберігання S, які позначені підсистемою моніторингу як потенційно ненадійні;

2. виділяється підграф G_R з мультиграфа G на основі підграфа G_S;

3. традиційним способом розраховується план міграції M_S для підграфа G_S, який містить m кроків, M_{Si} – крок плану міграції, i = 1..m;

4. традиційним способом розраховується план міграції M_R для підграфа G_R, який містить n кроків, M_{Rj} – крок плану міграції, j = 1..n;

5. шляхом покрокового виконання наступних операцій знаходиться загальний план міграції M для мультиграфа G:

5.1. з плану міграції M_S для підграфа G_S вибирається крок k з найменшою кількістю операцій переміщення даних;

5.2. з обраного кроку отримується множина пристроїв зберігання X_S, яки беруть участь у переміщенні даних на цьому кроці;

5.3. для кожного кроку M_{Rj}, j = 1..n з плану міграції M_R отримується множина пересилок даних T_{Rj} яки беруть участь у переміщенні даних на цьому кроці;

5.4. для кожної пересилки даних з T_{Rj} отримується множина пристроїв зберігання X_R, які беруть участь у цій пересилці;

5.5. якщо множини X_S та X_R не перетинаються, то пересилка даних додається до кроку k та видаляється з плану міграції M_R;

5.6. після того, як проглянуто усі кроки з плану міграції M_R, крок k додається до загального плану міграції M та видаляється з плану міграції M_S;

5.7. після того, як з плану міграції M_S видалені усі кроки та додані до плану міграції M, до M додаються також усі кроки плану міграції M_R, які залишились не використаними.

Тепер визначимо обчислювальну складність запропонованого алгоритму. Задача виділення підграфів з графа має лінійну обчислювальну складність O(V). Завдання паралельного об'єднання планів міграції має поліноміальну обчислювальну складність O(m*n), де m – кількість кроків у плані міграції для підграфа G_S, n – кількість кроків у плані міграції для підграфа G_R. Алгоритми зі статей [4] та [5] мають поліноміальну обчислювальну складність: O(A*(V+δ)) і O(A*logD), відповідно. Оскільки представлений алгоритм являє собою послідовне об'єднання кроків з першого по п'ятий, його обчислювальна складність дорівнює складності найбільш витратного кроку: max{O(V), O(A*logD), O(A*(V+δ)), O(m*n)} = max{O(A*logD), O(A*(V+δ))}. З цього випливає, що алгоритм має поліноміальну складність.

Оцінка ефективності запропонованого способу

Використовуючи традиційні способи міграції, відновлення коефіцієнту реплікації даних можна здійснити тільки після повного виконання процедури міграції даних. Це пов'язано з тим, що пристрої зберігання, які система моніторингу вважає потенційно ненадійними, можуть бути залучені до процедури міграції даних до самих останніх кроків. Запропонований у статті [6] спосіб виділяє в мультиграфі G масштабуючий підграф G_S, що містить всі масштабуючі пристрої, а в нашому випадку усі підозрілі пристрої. Це дозволяє швидше виконати процедуру міграції на цих пристроях. Зворотною стороною способу є необхідність виконання залишкової міграції в підграфі G_R після виконання міграції в G_S і послідовне об'єднання кроків міграції, яке збільшує загальний час міграції. У запропонованому способі послідовне об'єднання планів міграції у підграфах G_S та G_R замінюється на паралельне об'єднання отриманих планів міграції.

Для оцінки ефективності запропонованого способу було проведено його порівняння з традиційним способом міграції, якій оптимізований за загальним часом міграції на всіх пристроях зберігання, та зі способом, запропонованим у статті [6], якій також оптимізований за часом міграції на окремо виділених пристроях зберігання.

Під час проведення експериментів на вхід всіх способів подавалися однакові мультиграфи вимог G, які були отримані після розв'язання задачі розміщення з наступними вхідними параметрами:

• загальна кількість пристроїв зберігання - від 10 до 100 з кроком 10;

• кількість підозрілих пристроїв зберігання - 1 у всіх чергах експериментів.

Вихідними параметрами способів є:

• T(G) – загальний час міграції (у кроках) на всіх пристроях за традиційним способом;

• $T(G_S)$ – час міграції (у кроках) на потенційно ненадійних пристроях зберігання, розраховується як час міграції у підграфі G_S;

• $T(G_R)$ – час міграції (у кроках) на залишкових пристроях зберігання, розраховується як час міграції у підграфі G_R;

• $T(G_S) + T(G_R)$ — загальний час міграції (у кроках) на всіх пристроях за способом зі статті [7];

• $T_{PARALLEL}(G)$ – загальний час міграції (у кроках) на всіх пристроях за запропонованим способом.

Очевидно, що час міграції на масштабуючих пристроях для традиційного способу дорівнює загальному часу міграції T(G).

Виходячи з критеріїв задачі міграції даних в розподіленому сховищі, будемо використовувати наступні параметри оцінки:

1. P — час (у кроках), на який зменшується процес міграції з потенційно ненадійних пристроїв зберігання, де:

$$P = T(G) - T(G_S) \tag{12}$$

2. ΔP - це відносний виграш у часі міграції з потенційно ненадійних пристроїв зберігання, а отже й у часі відновлення коефіцієнту реплікації) при застосуванні запропонованого способу в порівнянні з традиційним способом, де:

$$\Delta P = \frac{P}{T(G)} = \frac{T(G) - T(G_S)}{T(G)} \tag{13}$$

3. $\Delta(T(G_S) + T(G_R))$ - це відносний виграш у загальному часі міграції при застосуванні запропонованого у статті [7] способу в порівнянні з традиційним способом, де:

$$\Delta L = \frac{T(G_S) + T(G_R)}{T(G)} - 1 \tag{14}$$

4. $\Delta T_{PARALLEL}(G)$ - це відносний виграш у загальному часі міграції при застосуванні запропонованого способу в порівнянні з традиційним способом, де:

$$\Delta L = \frac{T_{PARALLEL}(G)}{T(G)} - 1 \tag{15}$$

Було проведено 3 черги експериментів для різної відносної кількості елементів даних:

1. кількість елементів даних у 4 рази більша за кількість пристроїв зберігання;
2. кількість елементів даних у 8 разів більша за кількість пристроїв зберігання;
3. кількість елементів даних у 16 разів більша за кількість пристроїв зберігання.

В кожній черзі експериментів було проведено експерименти для різної кількості пристроїв зберігання в розподіленому сховищі: від 10 до 100 з кроком 10. Для кожного значення кількості пристроїв було проведено 100 експериментів. Остаточні значення вихідних параметрів отримувались усередненням. Результати усіх черг експериментів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментів

V	T(G)	$T(G_S)$	P	ΔP	$T(G_S)+T(G_R)$	$\Delta(T(G_S) + T(G_R))$	$T_{PARALLEL}(G)$	$\Delta T_{PARALLEL}(G)$
1 черга – кількість елементів даних – 4 * V								
10	14.00	12.26	1.74	12.4%	24.77	76.9%	22.74	62.4%
20	17.67	13.33	4.34	24.6%	30.13	70.5%	24.63	39.4%
30	19.22	14.18	5.04	26.2%	33.07	72.1%	24.42	27.1%
40	20.07	14.47	5.60	27.9%	34.11	70.0%	23.53	17.2%
50	20.67	14.79	5.88	28.4%	35.05	69.6%	23.39	13.2%
60	21.57	15.18	6.39	29.6%	36.26	68.1%	23.18	7.5%
70	21.62	15.47	6.15	28.4%	36.67	69.6%	23.01	6.4%
80	21.72	15.47	6.25	28.8%	36.94	70.1%	22.57	3.9%
90	22.11	15.47	6.64	30.0%	37.27	68.6%	22.51	1.8%
100	22.08	15.28	6.80	30.8%	37.03	67.7%	22.62	2.4%
2 черга – кількість елементів даних – 8 * V								
10	19.74	19.30	0.44	2.2%	37.12	88.0%	33.74	70.9%
20	28.86	24.45	4.41	15.3%	51.82	79.6%	45.72	58.4%
30	33.72	25.03	8.69	25.8%	57.53	70.6%	48.84	44.8%
40	35.98	26.54	9.44	26.2%	61.64	71.3%	48.62	35.1%

V	T(G)	$T(G_S)$	P	ΔP	$T(G_S)+T(G_R)$	$\Delta(T(G_S) + T(G_R))$	$T_{PARALLEL}(G)$	$\Delta T_{PARALLEL}(G)$
50	37.89	27.17	10.72	28.3%	64.33	69.8%	48.18	27.2%
60	38.89	27.76	11.13	28.6%	66.13	70.0%	47.29	21.6%
70	40.04	28.30	11.74	29.3%	68.08	70.0%	46.67	16.6%
80	40.75	28.97	11.78	28.9%	69.34	70.2%	46.61	14.4%
90	41.54	29.41	12.13	29.2%	70.40	69.5%	46.14	11.1%
100	41.99	29.56	12.43	29.6%	71.11	69.3%	45.60	8.6%
3 черга – кількість елементів даних – 16 * V								
10	23.87	23.75	0.12	0.5%	46.20	93.5%	40.59	70.0%
20	42.04	40.47	1.57	3.7%	80.18	90.7%	70.11	66.8%
30	52.99	47.29	5.70	10.8%	98.54	86.0%	84.52	59.5%
40	59.92	48.30	11.62	19.4%	106.93	78.5%	90.89	51.7%
50	64.95	48.49	16.46	25.3%	112.36	73.0%	94.37	45.3%
60	68.37	49.81	18.56	27.1%	117.42	71.7%	95.34	39.4%
70	71.52	51.11	20.41	28.5%	121.28	69.6%	95.52	33.6%
80	73.61	52.55	21.06	28.6%	125.27	70.2%	95.60	29.9%
90	75.16	53.82	21.34	28.4%	128.24	70.6%	94.20	25.3%
100	76.51	55.07	21.44	28.0%	130.90	71.1%	93.94	22.8%

На рисунках 3 та 4 зображені графіки відношення значень ΔP та $\Delta T_{PARALLEL}(G)$ від кількості пристроїв зберігання даних V для усіх черг експериментів.

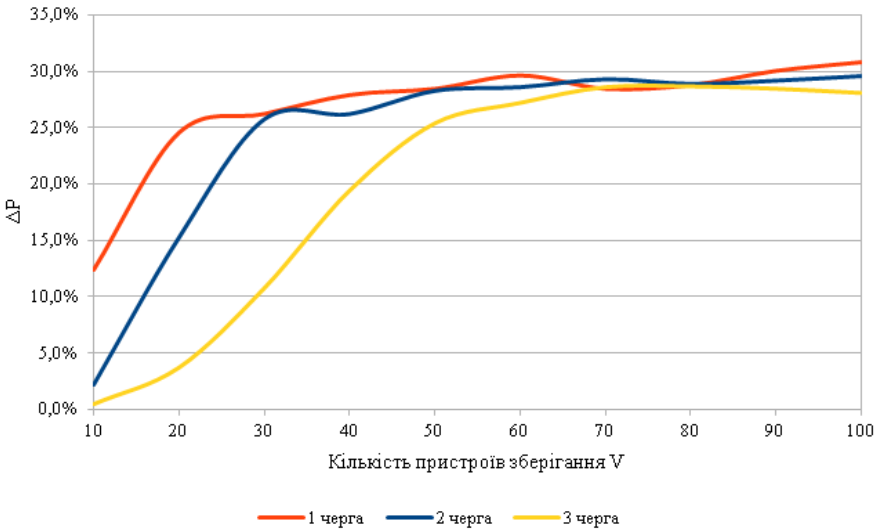


Рис. 3. Графік відношення значення ΔP від кількості пристроїв зберігання даних V для усіх черг експериментів.

Як видно з таблиці та графіків, запропонований спосіб міграції даних дозволяє зменшити час міграції з пристроїв, які помічені підсистемою моніторингу як потенційно ненадійні, при будь-якій кількості пристроїв зберігання та при будь-якій кількості елементів даних. Це своєю чергою зменшує час відновлення коефіцієнту реплікації у розподілених сховищах будь-якого розміру. Зменшення часу відновлення коефіцієнту реплікації досягає 30%.

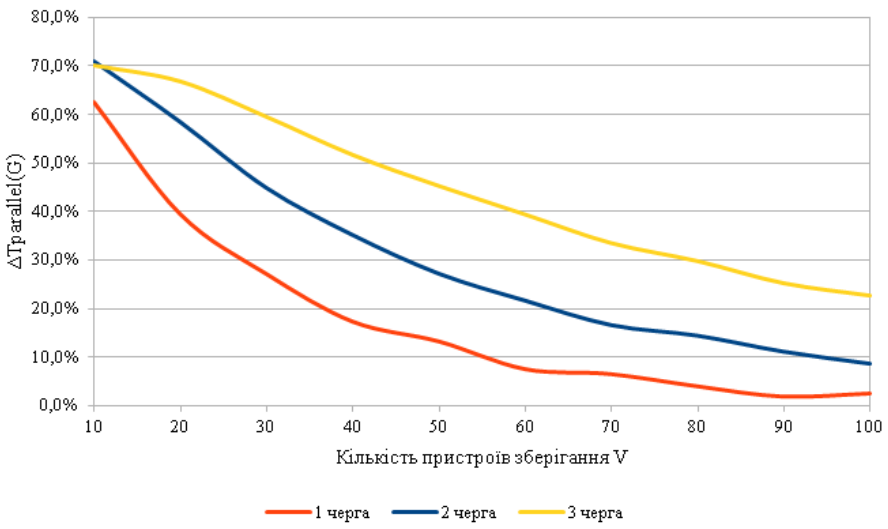


Рис. 4. Графік відношення значення $\Delta T_{PARALLEL}(G)$ від кількості пристроїв зберігання даних V для усіх черг експериментів.

Зменшення часу відновлення коефіцієнту реплікації відбувається коштом збільшення загального часу міграції даних, що досягає 70% при малій кількості пристроїв зберігання та поступово зменшується з ростом кількості пристроїв.

Висновки

В роботі розглянуто проблеми розв'язання задач міграції даних та відновлення коефіцієнту реплікації в розподілених масштабованих сховищах. Було запропоновано спосіб складання плану міграції даних з поліноміальною обчислювальною складністю. Показано, що запропонований алгоритм є оптимальним за часом міграції на пристроях, які позначені підсистемою моніторингу як потенційно ненадійні, а отже й за часом відновлення коефіцієнту реплікації у розподіленому сховищі. Експериментально показано, що запропонований спосіб однаково ефективний для розподілених сховищ з різною кількістю пристроїв зберігання та різною кількістю елементів даних, та здатний зменшувати час відновлення коефіцієнту реплікації у розподіленому сховищі до 30% коштом збільшення загального часу міграції даних на 20%.

Література

1. Hall J., Hartline J., Karlin A., Saia J., Wilkes J. On Algorithms for Efficient Data Migration // ACM Symposium on Discrete Algorithms. – 2001. – P. 620–629.

2. Vladishev A. What's new in Zabbix 5.2 [Електронний ресурс] / A. Vladishev // Zabbix blog. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://blog.zabbix.com/whats-new-in-zabbix-5-2/12550/.

3. Holyer I. The NP-completeness of Edge-Coloring // SIAM J. Comp. – 1982. No11. – P. 117–129.

4. Hochbau D. S., Nishizeki T., Shmoys D. B. A better than "Best Possible" algorithm to edge color multigraphs // J. off Algorithms. – 1986. – No7. – P. 79–104.

5. Cole R., Ost K., Schirra S. Edge-coloring bipartite multigraphs in O(E log D) time // Combinatorica. – 2001. – №21. – P. 5–12.

6. Петров Д. Л. Оптимальний алгоритм міграції даних у масштабованих хмарних сховищах // Управління великими системами. – 2010. – No30. – С. 180–197.

7. Dmitrienko P. Methods of evaluating the effectiveness of systems for computing resources monitoring // Computer Research and Modeling – No. 3(4). – 2012 –pp. 661-668.

References

1. Hall J., Hartline J., Karlin A., Saia J., Wilkes J. On Algorithms for Efficient Data Migration // ACM Symposium on Discrete Algorithms. – 2001. – P. 620–629.

2. Vladishev A. What's new in Zabbix 5.2 [Електронний ресурс] / A. Vladishev // Zabbix blog. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://blog.zabbix.com/whats-new-in-zabbix-5-2/12550/.

3. Holyer I. The NP-completeness of Edge-Coloring // SIAM J. Comp. – 1982. No11. – P. 117–129.

4. Hochbau D. S., Nishizeki T., Shmoys D. B. A better than "Best Possible" algorithm to edge color multigraphs // J. off Algorithms. – 1986. – No7. – P. 79–104.

5. Cole R., Ost K., Schirra S. Edge-coloring bipartite multigraphs in O(E log D) time // Combinatorica. – 2001. – №21. – P. 5–12.

6. Petrov D. Optymaljnyj alghorytm mighraciji danykh u masshtabovanykh khmarnykh skhovyshhakh / D. Petrov // Upravlinnja velykymy systemamy. – 2010. – No 30. – S. 180–197.

7. Dmitrienko P. Methods of evaluating the effectiveness of systems for computing resources monitoring // Computer Research and Modeling – No. 3(4). – 2012 –pp. 661-668.

Надійшла / Paper received : 18.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-22-27
УДК 004.75:004.8:004.49

А.С. КАШТАЛЬЯН, О.С. САВЕНКО
Хмельницький національний університет

КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ЗЛОВМИСНИКІВ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ЇХ ПОВЕДІНКОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В статті запропоновано метод знаходження схожих зловмисників в мережі приманок за їх поведінковими характеристиками. Розглянуто частотні характеристики, які дозволяють визначити тип атаки, а також спрогнозувати її. Запропоновано розглядати поведінкові характеристики зловмисників щодо мережі приманок як багато до багатьох, багато до одного, один до багатьох та один до одного. За поведінкову характеристику для розгляду обрано часовий ряд, який представляє залежність кількості запитів від джерела атаки до приманки за одиницю часу. Розглянуто інформаційні критерії, які можуть бути використані для кластеризації поведінкових характеристик зловмисників.

Запропоновано процедуру агломеративної кластеризації поведінкових характеристик на основі інформаційного критерію. Визначено критерій відстані між кластерами та інтегральний критерій відстані між об'єктами всередині кластеру. Визначено три критерії зупинки процесу кластеризації: кількість кластерів, абсолютний мінімум та відносний градієнт. Кількість кластерів у якості критерію зупинки дозволяє визначати рівень небезпеки зловмисників. Критерій абсолютного мінімуму відповідає максимальній чистоті кластерів зловмисників. Критерій відносного градієнту забезпечує найвищу повноту кластерів.

На основі даних мережі приманок проведено експериментальні дослідження, на їх основі визначено інформаційний критерій, який забезпечує найвищу точність кластеризації, та критерій зупинки, який забезпечує оптимальне співвідношення точності та повноти кластерів.

Ключові слова: приманка, кластеризація часових рядів, профіль зловмисника, частотні характеристики, інформаційний критерій.

A.S. KASHTALIAN, O.S. SAVENKO
Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

CLUSETRING OF INTRUDERS IN COMPUTER NETWORKS BY THEIR BEHEVIOUR CHARACTERISTIC

The method of finding similar intruders in a honeynet by their behavior characteristics is suggested. Frequency characteristics which allow to determine attack's type and to predict it is considered. It is proposed to consider behavior characteristic of intruders with regard to a honeynet as many to many, many to one, one to many and one to one. A time series which represents the dependence of the number of requests from an attack's source to a honeypot per time unit is chosen as a behavior characteristic to examine. It is considered the information criterions which can be used for clustering intruders' behavior characteristics.

It is proposed the procedure of agglomerative clustering behavior characteristics on the basis of the information criterion. It is defined distances between clusters and the integral criterion of a distance between objects inside a cluster. It is determined three criterions of stopping the clustering process: the number of clusters, the absolute minimum, the relative gradient. The number of clusters as a stop criterion allows determining the level of a damage of intruders. The absolute minimum criterion corresponds to the maximum purity of intruders clusters. The relative gradient criterion provides the highest cluster completeness.

The experimental researches were conducted based on data of the honeynet. It is defined the information criterion which provides the highest accuracy of clustering and the stop criterion which provides the optimal ratio of the accuracy and the completeness of clusters on their basis.

Keywords: honeypot, time series clustering, intruder's profile, frequency characteristics, information criterion.

Вступ. Постановка проблеми

Біля 20% зловмисних доменів є новими і використовуються в середньому 1 тиждень після реєстрації [1]. З постійно виникаючими новими загрозами ризики для безпеки інформації комп'ютерних мережах значно зростають. Для захисту комп'ютерних мереж розроблено і використовуються багато рішень, які дозволяють ефективно виявляти атаки в процесі їх дії та аналізувати атаки, які вже відбулися. Однак для більш ефективного захисту необхідний збір та аналіз інформації, що стосується вразливостей системи та характеристик зловмисників до того, як зловмисні дії завдадуть суттєвої шкоди. Саме для цих цілей призначені приманки та їх мережі [2]. Приманка – це засіб, що дозволяє «заманити» зловмисника та зібрати про нього інформацію до того, як зловмисник проникне в реальну мережу. Оскільки приманка не виконує реальних функцій, то увесь трафік, який надходить на неї, можна вважати зловмисним. Якщо розглядати мережу приманок, то її трафік представляє собою результат дій зловмисників. Зловмисники можуть бути різного типу та здійснювати атаки різного типу з різним рівнем небезпеки. Незважаючи на значну кількість зловмисників, їх дії є подібними за своєю метою та способом здійснення. Тому, важливою задачею є знаходження груп подібних зловмисників для подальшого використання цієї інформації в системах виявлення зловмисників в реальному часі.

В більшості випадків для систем виявлення втручань виконується кластеризація відносно зловмисних дій за традиційними та сучасними підходами. В роботі [3] пропонується використовувати кластеризацію за *k*-середніми. В сучасних системах використовуються нейромережеві моделі [4] та генетичні алгоритми [5]. Також використовуються підходи до кластеризації атак на основі дерев рішень [6] та методу опорних векторів [7]. В багатьох роботах не розглядається питання визначення оптимальної кількості кластерів та характеристики атак часто розглядаються як статичні. В даній роботі кластеризація

зловмисних дій проводиться групуючись на динамічних характеристиках джерел атак та кількість кластерів визначається автоматично.

1. Частотні характеристики джерел атак.

Інформація, яку збирає приманка, описує характеристики зловмисників. Серед таких характеристик важливе місце займають частотні характеристики, до яких можна віднести: кількість джерел атак за одиницю часу; кількість нових джерел, що додаються за одиницю часу; кількість джерел атак в певній IP-агломерації; кількість джерел на кількість атак; кількість запитів за одиницю часу; кількість переданих пакетів за одиницю часу. Спостереження свідчать, що у випадку використання TCP протоколу, розміри пакетів є практично однаковими [8].

Частотні характеристики атак в багатьох випадках дозволяють визначити тип атаки, а отже дають можливість її прогнозувати. А також на основі частотних характеристик можна визначити рівень небезпеки зловмисника в реальному часі та вжити відповідних заходів.

Відношення джерел атак до приманок можна описати як багато до багатьох, оскільки один зловмисник здійснює атаки на різні цілі, так само одна приманка піддається впливу атак багатьох джерел. Якщо розглядати відношення один до багатьох (одне джерело атаки, багато приманок), отримаємо профіль зловмисника. Якщо розглядати відношення багато до одного (багато джерел атак, одна приманка), отримаємо характеристики розподіленої атаки, а також профіль вразливостей приманки.

Профіль зловмисника, який може атакувати певну кількість приманок, може бути розглянутий як інтегральний профіль, що складається з профілів один до одного (одне джерело атаки, одна приманка). Для отримання інтегрального профілю зловмисника необхідно отримати характеристики атак на приманки з точки зору відношення один до одного. Якщо розглядати всі атаки на приманку в межах заданого часового інтервалу, то вони в загальному випадку можуть бути результатом різних типів атак.

Розглянемо в якості поведінкової характеристики зловмисника часовий ряд, що представляє собою кількість запитів від одного джерела атаки до однієї приманки за інтервал часу в 1 секунду. Врахуємо той факт, що всі запити представляють собою зловмисну активність.

Часовий ряд кількості запитів від *i*-го джерела атаки до *j*-ї приманки за одиницю часу:

$$X^{ij} = \left\{x_1^{ij}, x_2^{ij}, x_3^{ij}, \ldots, x_k^{ij}\right\},$$

де x_k^{ij} – кількість запитів від *i*-го джерела до *j*-ї приманки за 1 сек.; *k* – тривалість досліджуваного часового вікна; $i=1,2,3,\ldots,m$, *m* – кількість джерел атак; $j=1,2,3,\ldots n$, *n* – кількість приманок.

2. Інформаційні критерії, використані для кластеризації.

Завдання кластеризації часових рядів передбачає виявлення патернів, які представляють часовий ряд якомога інформативніше [9]. Особливість кластеризації часових рядів полягає в тому, що ознаки змінюються в часі. Методи кластеризації часових рядів можна розділити та три типи: методи, в яких використовуються безпосередньо необроблені дані; методи, які використовуються вилучені ознаки; методи, які ґрунтуються на моделях часових рядів. [10].

Методи, що ґрунтуються на моделях, передбачають попередню трансформацію даних часових рядів шляхом визначення параметрів моделі. Використовуються моделі різного типу, зокрема: динамічна регресія; ARMA, ARIMA, ARFIMA; GARCH, NGARCH; нейромережеві моделі. Метою використання параметрів моделі часового ряду замість його значень є перехід до простору ознак, в якому можна виконати кластеризацію. Для визначення відстаней між параметрами моделей часових рядів використовується ряд інформаційних критеріїв.

Інформаційний критерій визначається як подвоєне негативне значення зміщеної корекції

$$-2\log L\left(\hat{\Psi}\right) + 2C,$$

де L – функція максимальної правдоподібності, $\hat{\Psi}$ – вектор параметрів, C – міра складності (штрафний член). Критерій використовується для вибору моделі, яка забезпечує його мінімум.

Інформаційний критерій Акаіке [11]

$$AIC = -2\log L\left(\hat{\Psi}\right) + 2d,$$

де d –число параметрів моделі.

Модифікований критерій Акаіке у випадку числа параметрів моделі d достатньо великого відносно розміру вибірки *n*.

$$AIC_C = -2\log L\left(\hat{\Psi}\right) + 2dn/\left(n-d-1\right).$$

Інформаційний критерій Кульбака [12]

$$KIC = -2\log L\left(\hat{\Psi}\right) + 3\left(d+1\right).$$

Байєсівський інформаційний критерій [13]

$$BIC = -2\log L(\hat{\Psi}) + d\log(n).$$

Розглянемо більш детально розрахунок інформаційного критерію як міри подібності двох часових рядів на основі байєсівського інформаційного критерію. Нехай задані два часових ряди, представлені векторами $X = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_{n_x}\}$ та $Y = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \ldots, \mathbf{y}_{n_y}\}$. Необхідно оцінити наступні дві гіпотези [14]:

$$H_1 : \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_{n_x}, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \ldots, \mathbf{y}_{n_y} - N(\mu, \Sigma),$$
$$H_2 : \begin{array}{l} \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_{n_x} - N(\mu_X, \Sigma_X); \\ \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \ldots, \mathbf{y}_{n_y} - N(\mu_Y, \Sigma_Y). \end{array}$$

Гіпотеза H_1 передбачає, що X та Y отримані з однієї моделі, гіпотеза H_2 означає, що X та Y формуються двома моделями. Нехай $Z = X \cup Y$ та $n = n_x + n_y$. Тоді, різниця між величинами байєсівського критерію для двох гіпотез може бути визначена таким чином:

$$\Delta BIC(X,Y) = BIC(H_1, Z) - BIC(H_2, Z) =$$
$$= \log p(X \mid \hat{\boldsymbol{\mu}}_X, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_X) + \log p(Y \mid \hat{\boldsymbol{\mu}}_Y, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_Y) - \log p(Z \mid \hat{\boldsymbol{\mu}}, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}) - \frac{1}{2}\lambda\left(d + \frac{1}{2}d(d+1)\right)\log n =$$
$$= \frac{n}{2}\log\left|\hat{\boldsymbol{\Sigma}}\right| - \frac{n_x}{2}\log\left|\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_X\right| - \frac{n_y}{2}\log\left|\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_Y\right| - \frac{1}{2}\lambda\left(d + \frac{1}{2}d(d+1)\right)\log n,$$

де $\hat{\boldsymbol{\mu}}$, $\hat{\boldsymbol{\mu}}_X$ та $\hat{\boldsymbol{\mu}}_Y$ - вектори середніх значень вибірок Z, X та Y відповідно; $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$, $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_X$ та $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_Y$ - коваріаційні матриці вибірок; d – розмірність вектора ознак [15]. Чим менша величина ΔBIC, тим більш схожими є два часових ряди. За умови $\lambda = 0$ відстань ΔBIC є еквівалентною відношенню правдоподібності.

3. Агломеративна кластеризація зловмисників за поведінковими характеристиками.

Процедура кластеризації часових рядів, які характеризують профілі зловмисників, ґрунтується на процедурі агломеративної кластеризації та включає такі кроки:

1. Визначення початкових кластерів. На першому етапі кластеризації кожний часовий ряд представляє собою кластер. Відповідно множина кластерів має вигляд:

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \ldots, C_l\}$$

де $C_1 = \{X^{11}\}, C_2 = \{X^{12}\}$, $C_3 = \{X^{13}\}$, і так далі, $C_l = \{x^{mn}\}$; $l = m \times n$ - кількість початкових кластерів.

2. Визначення відстаней між парами кластерів, які визначають на основі одного з інформаційних критеріїв, наведених вище. Якщо в якості такого інформаційного критерію використовується байєсівський інформаційний критерій, то відстань між двома кластерами $C_i = \{X_1, X_2, X_3, \ldots, X_m\}$ та $C_j = \{Y_1, Y_2, Y_3, \ldots, Y_n\}$ визначається як

$$D_{ij} = \Delta BIC(C_i, C_j) = \frac{\sum_{a=1}^{m}\sum_{b=1}^{n}\Delta BIC(X_a, Y_b)}{|C_i \times C_j|}, \; a \neq b,$$

де m – кількість об'єктів (часових рядів) в кластері C_i; n – кількість об'єктів (часових рядів) в кластері; i,j=1,2,3…l – кількість кластерів поточної ітерації процесу кластеризації.

3. Визначення з множини відстаней $D = \{D_{12}, D_{13}, \ldots, D_{ij}, \ldots, D_{l-1,l}\}$ мінімальної для поточної ітерації $D_{\min iter} = \min(D) = D_{ij}$, вибір відповідної пари кластерів C_i та C_j та об'єднання множин об'єктів цих двох кластерів в один кластер $C_{join(ij)} = C_i \cup C_j$.

4. Визначення інтегрального критерію відстаней між об'єктами всередині кластера. Інтегральний критерій визначається на основі одного з інформаційних критеріїв. Якщо цей критерій визначається на основі байєсівського інформаційного критерію, то він має вигляд:

$$J = \frac{\sum_{i=1}^{l}\Delta BIC(C_i)}{l},$$

де $\Delta BIC(C_i)$ - відстань між об'єктами всередині одного кластеру; i=1,2,3,…,l; l – кількість кластерів. Ця відстань для кластера $C_i = \{X_1, X_2, X_3, \ldots, X_m\}$ визначається за співвідношенням:

$$\Delta BIC(C_i) = \frac{\sum_{a=1}^{m}\sum_{b=a}^{m} \Delta BIC(X_a, X_b)}{m}.$$

5. Перевірка умови зупинки процесу об'єднання кластерів. Якщо умова виконана, отримують остаточну множину кластерів $C_{res} = \{C_1, C_2, C_3, \ldots, C_{lres}\}$, де l_{res} – остаточна кількість кластерів. Виконання пунктів 2-5 повторюється до тих пір, поки умова зупинки не буде виконана.

Для зупинки процесу об'єднання кластерів використовується один з трьох критеріїв:

1. Кількість кластерів. Вимагає задання числа кластерів, що може потребувати попередньої оцінки. В загальному випадку кількість кластерів профілів зловмисників не є попередньо відомою. Тому рекомендується використовувати цей критерій зупинки для задачі визначення рівня небезпеки зловмисника.

2. Абсолютний мінімум функції залежності інтегрального критерію від числа ітерацій об'єднання кластерів $\min(J(k))$, де k – число ітерацій. У цьому випадку обирається множина кластерів, що відповідає ітерації, на якій спостерігається мінімум $J(k)$ (рис. 1(1)). Цей критерій зупинки забезпечує максимально чистоту отриманих кластерів. Недоліком є те, що частина кластерів може бути неповною, і зловмисників одного типу може містити більше ніж один кластер.

3. Градієнтний критерій. У цьому випадку визначається стрибок функції залежності відносного градієнта $\nabla J(k)/J(k)$ від числа ітерацій та обирається множина кластерів, відповідна цій ітерації (рис. 1(2)).

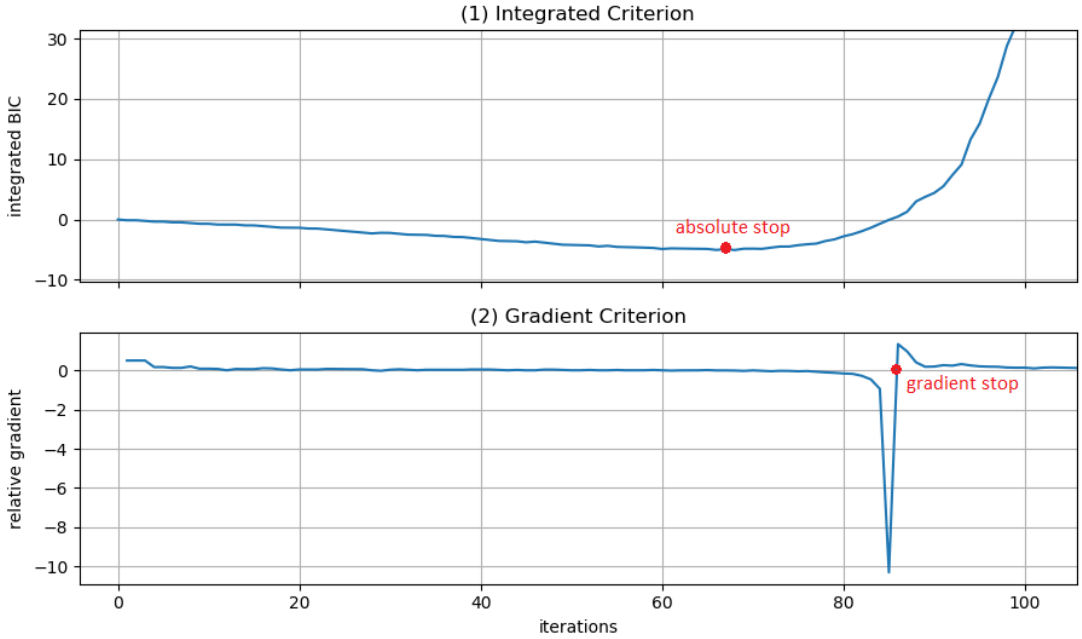


Рис. 1. Критерії зупинки процесу об'єднання кластерів. (1)Залежність інтегрального критерію відстаней між об'єктами всередині кластера від кількості ітерацій *J*(*k*). (2)Залежність відносного градієнту функції $\nabla J(k)/J(k)$ від кількості ітерацій.

4. Результати кластеризації зловмисників

Для проведення експериментальних досліджень було використано датасет мережі приманок [16]. З датасету були відібрані часові ряди кількості запитів за 1 секунду від одного джерела атаки до однієї приманки, які сформували набір часових рядів для кластеризації. Кластеризація проводилася із використанням трьох інформаційних критеріїв (AIC, KIC, BIC), також з використанням двох критеріїв зупинки процесу кластеризації (абсолютний мінімум та відносний градієнт). Найвищі показники точності показала кластеризація на основі BIC критерію із зупинкою за відносним градієнтом. Точність кластеризації перевищила 80%, а зупинка за відносним градієнтом забезпечила оптимальне співвідношення чистоти кластерів та їх повноти. Також, було проведено кластеризацію з числом кластерів 3 для визначення відносного рівня небезпеки зловмисника: високого, середнього та низького (рис. 2).

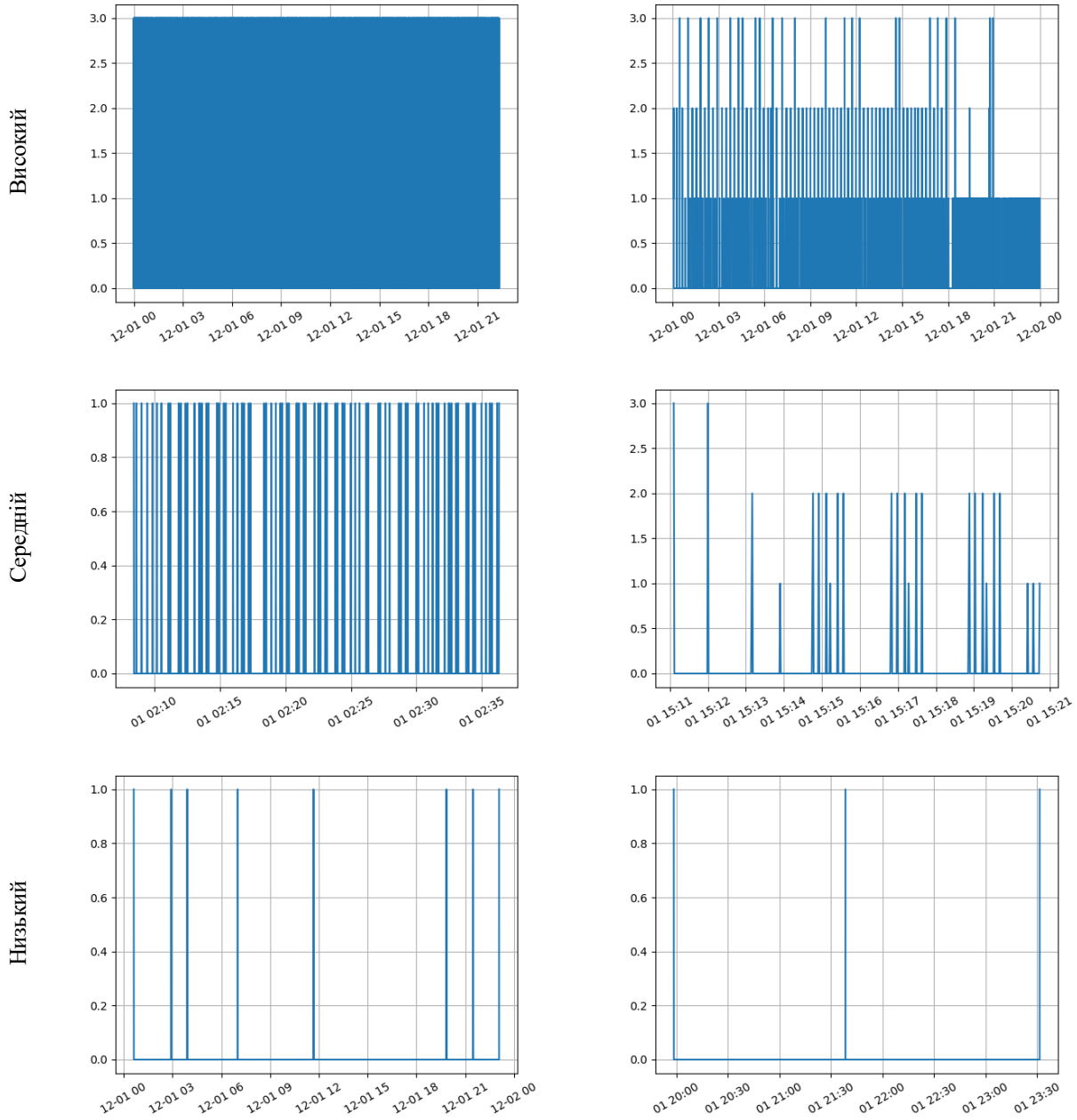


Рис. 2. Приклади частотних характеристик зловмисників з різними рівнями загрози.

Висновки

Збір та аналіз приманками поведінкових характеристик зловмисників дозволяє виявляти та групувати нові типи атак, що є надзвичайно важливим для систем виявлення втручань. Запропонований підхід дозволяє проводити неперервний пошук подібних зловмисників з врахуванням їх динамічних характеристик. Запропонована процедура агломеративної кластеризації на основі інформаційних критеріїв дозволяє отримати достатню точність кластеризації та визначити рівень небезпеки зловмисника.

Подальше дослідження проводиться в напрямку визначення поведінкових патернів зловмисників на основі відношення «один до багатьох», підвищення точності кластеризації та врахування додаткових поведінкових характеристик.

Література

1. Cisco 2019. Annual Report. Defining the Future of the Internet/ https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/annual-report/cisco-annual-report-2019.pdf. [Access 29.09.2020].

2. Каштальян А.С. Покращення безпеки та модель антивірусних інтелектуальних приманок в корпоративних комп'ютерних мережах/ А.С. Каштальян, О.С. Савенко// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2020, №4, с. 33-38.

3. Varaprasad Rao M. Algorithm for Clustering with Intrusion Detection using Modified & Hashed K-Means Algorithms/ M. Varaprasad Rao, A. Damodaram, N. Ch. Bhatra Charyulu// Proceedings of 2nd International

Conference on Computer Science Engineering Applications, New Delhi, India, Springer Publications Vol 2, May 25-27, 2012, pp 737-744.

4. Debar H. A neural network component for an intrusion detection system/ H. Debar, M. Becker, and D. Siboni// in Proceedings 1992 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy, 1992, pp. 240–250.

5. Bhattacharjee P.S. Intrusion detection system for nsl-kdd data set using vectorised fitness function in genetic algorithm/ P. S. Bhattacharjee, A. K. M. Fujail, and S. A. Begum// Adv. Comput. Sci. Technol., vol. 10, no. 2, 2017, pp. 235–246.

6. Sung S. Jo H. comparative study on the performance of intrusion detection using decision tree and artificial neural network models/ S. Jo, H. Sung, and B. Ahn// Journal of the Korea Society of Digital Industry and Information Management, vol. 11, no. 4, 2015, pp. 33–45.

7. Puri A. A novel technique for intrusion detection system for network security using hybrid svm-cart/ A. Puri and N. Sharma// IJEDR, vol. 5, no. 2, 2017, pp. 155–161.

8. Yegneswaran V. On the design and use of internet sinks for network abuse monitoring/ V. Yegneswaran, P. Barford, D. Plonka// Recent Advances in Intrusion Detection. Springer, 2004, pp. 146-165.

9. Iglesias Felix. Analysis of Similarity Measures in Times Series Clustering for the Discovery of Building Energy Patterns/ Felix Iglesias, Wolfgang Kastner/ Energies, №6, 2013, pp. 579-597.

10. Warren Liao T. Clustering of time series data—a survey/ T. Warren Liao// Pattern Recognition 38 (2005) 1857 – 1874 – pp. 1857-1874.

11. Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In Second International Symposium on Information Theory; Petrov, B.N., Csaki, F., Eds.; Akademiai Kiado: Budapest, Hungary, 1973; pp. 267–281.

12. Cavanaugh J.E. A large-sample model selection criterion based on Kullback's symmetric divergence/ J. E. Cavanaugh// Stat. Probab. Lett. 1999, 42, 333–343.

13. Schwarz G. Estimating the dimension of a model/ G. Schwarcz// Ann. Stat. 1978, 6, 461–464.

14. Chen S. Speaker, environment and channel change detection and clustering via the Bayesian information criterion/ S. Chen and P. S. Gopalakrishnan// in Proc. DARPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop, Lansdowne, VA, Feb. 1998, pp. 127–132.

15. Cettolo M. Evaluation of BIC-based algorithms for audio segmentation/ M. Cettolo, M. Vescovi, and R. Rizzi// Computer Speech and Language, vol. 19, 2005, pp. 147–170.

16. Traffic Data from Kyoto University's Honeypots, https://www.takakura.com/Kyoto_data/ [Access 01.10.2020].

References

1. Cisco 2019. Annual Report. Defining the Future of the Internet/ https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/annual-report/cisco-annual-report-2019.pdf. [Access 29.09.2020].

2. Kashtalian A.S. Security Improvement and the Model of Anti-Virus Intellectual Honeynet in Corporate Computer Networks/ A.S. Kashtalian, O.S. Savenko// Herald of Khmelnitsky National University, 2020, Issue 4, pp. 33-38.

3. Varaprasad Rao M. Algorithm for Clustering with Intrusion Detection using Modified & Hashed K-Means Algorithms/ M. Varaprasad Rao, A. Damodaram, N. Ch. Bhatra Charyulu// Proceedings of 2nd International Conference on Computer Science Engineering Applications, New Delhi, India, Springer Publications Vol 2, May 25-27, 2012, pp 737-744.

4. Debar H. A neural network component for an intrusion detection system/ H. Debar, M. Becker, and D. Siboni// in Proceedings 1992 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy, 1992, pp. 240–250.

5. Bhattacharjee P.S. Intrusion detection system for nsl-kdd data set using vectorised fitness function in genetic algorithm/ P. S. Bhattacharjee, A. K. M. Fujail, and S. A. Begum// Adv. Comput. Sci. Technol., vol. 10, no. 2, 2017, pp. 235–246.

6. Sung S. Jo H. comparative study on the performance of intrusion detection using decision tree and artificial neural network models/ S. Jo, H. Sung, and B. Ahn// Journal of the Korea Society of Digital Industry and Information Management, vol. 11, no. 4, 2015, pp. 33–45.

7. Puri A. A novel technique for intrusion detection system for network security using hybrid svm-cart/ A. Puri and N. Sharma// IJEDR, vol. 5, no. 2, 2017, pp. 155–161.

8. Yegneswaran V. On the design and use of internet sinks for network abuse monitoring/ V. Yegneswaran, P. Barford, D. Plonka// Recent Advances in Intrusion Detection. Springer, 2004, pp. 146-165.

9. Iglesias Felix. Analysis of Similarity Measures in Times Series Clustering for the Discovery of Building Energy Patterns/ Felix Iglesias, Wolfgang Kastner/ Energies, №6, 2013, pp. 579-597.

10. Warren Liao T. Clustering of time series data—a survey/ T. Warren Liao// Pattern Recognition 38 (2005) 1857 – 1874 – pp. 1857-1874.

11. Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In Second International Symposium on Information Theory; Petrov, B.N., Csaki, F., Eds.; Akademiai Kiado: Budapest, Hungary, 1973; pp. 267–281.

12. Cavanaugh J.E. A large-sample model selection criterion based on Kullback's symmetric divergence/ J. E. Cavanaugh// Stat. Probab. Lett. 1999, 42, 333–343.

13. Schwarz G. Estimating the dimension of a model/ G. Schwarcz// Ann. Stat. 1978, 6, 461–464.

14. Chen S. Speaker, environment and channel change detection and clustering via the Bayesian information criterion/ S. Chen and P. S. Gopalakrishnan// in Proc. DARPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop, Lansdowne, VA, Feb. 1998, pp. 127–132.

15. Cettolo M. Evaluation of BIC-based algorithms for audio segmentation/ M. Cettolo, M. Vescovi, and R. Rizzi// Computer Speech and Language, vol. 19, 2005, pp. 147–170.

16. Traffic Data from Kyoto University's Honeypots, https://www.takakura.com/Kyoto_data/ [Access 01.10.2020].

Надійшла / Paper received : 12.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-28-32
УДК 004.056.53

П.М. ШПАТАР, О.В. ГРЕСЬ, В.В. КАЧУР, А.Я. ТОМУЛЕЦЬ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ДЕТЕКТУВАННЯ ПООДИНОКИХ ФОТОНІВ В КВАНТОВИХ КРИПТОГРАФІЧНИХ СИСТЕМАХ

Технологія квантової криптографії, основана на квантових властивостях світла, дозволяє передавати по незахищеному каналу зв'язку випадкову послідовність біт таким чином, що втручання зловмисника в процес передачі породжує додатковий шум в каналі і виявляється легітимними користувачами. Одним із важливих елементів системи квантової розсилки ключа є детектор поодиноких фотонів.

Квантова криптографія виводить на новий рівень стандарти захищеної передачі даних через відкриті канали зв'язку. Проте, практична реалізація протоколів квантової криптографії на базі доступних на сьогоднішній день компонентів стикається зі значними труднощами.

В статті запропонована апаратна реалізація пристрою реєстрації поодиноких фотонів на ESP8266. Запропонований пристрій підвищує точність вимірювання інтенсивності випромінювання з допомогою лавинного фотодіода, що працює в режимі лічильника фотонів, за допомогою стабілізації величини різниці між напругою живлення і напругою пробою лавинного фотодіода без втрат часу вимірювання.

Ключові слова: квантова криптографія, детектори поодиноких фотонів, лавинні фотодіоди, оптоволоконні лінії зв'язку, розподілення квантового ключа.

P. SHPATAR, O. HRES, V. KACHUR, A. TOMULETS
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

DETECTION OF SINGLE PHOTONS IN QUANTUM CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS

Quantum cryptography technology, based on the quantum properties of light, allows an unsecured sequence of bits to be transmitted over an unsecured communication channel in such a way that an intruder interferes with the transmission process and creates additional noise in the channel and is legitimate by users. One of the important elements of the quantum key distribution system is the single photon detector.

The basic principles of data protection in quantum communication lines are the impossibility of copying the previously unknown state of an individual quantum object and the impossibility of obtaining any information about the quantum states of this object without damaging them. Thus, the guarantee of protection of transmitted information are the fundamental laws of quantum mechanics.

Quantum cryptography takes to a new level the standards of secure data transmission over open communication channels. However, the practical implementation of quantum cryptography protocols based on currently available components faces significant difficulties.

Therefore, the development of new protocols for quantum key distribution, as well as achieving a high level of their cryptographic stability through the use of sensitive detectors of single photons based on avalanche photodiodes is an actual problem.

The article proposes a hardware implementation of a single photon detection device on ESP8266. The proposed device increases the accuracy of measuring the intensity of radiation using an avalanche photodiode operating in the mode of a photon counter, by stabilizing the value of the difference between the supply voltage and the breakdown voltage of the avalanche photodiode without loss of measurement time. With this system, measurements can be made at room temperature without the use of energy-intensive refrigerants. Dark noise and temperature instability are taken into account in the value of the voltage ΔU. The developed device allows to increase the quantum efficiency of registration up to 45%.

Keywords: quantum cryptography, single photon detectors, avalanche photodiodes, fiber optic communication lines, quantum key distribution.

Постановка проблеми. Необхідність реєстрації поодиноких фотонів виникла ще в 20 столітті після фундаментальних робіт М. Планка та А.Ейнштейна. Перші прилади, що дозволяють здійснювати таку реєстрацію, багатокаскадні фотоелектронні помножувачі, були створені в 30-х роках минулого століття. Подальші вдосконалення фотоелектронних помножувачів полягали в розширенні їх оптичного діапазону і збільшенні коефіцієнту підсилення. Тенденція підвищення швидкодії та квантової ефективності привела до створення лавинних фотодіодів (ЛФД). При роботі в якості детектора фотонів ЛФД переводиться в режим, близький до лавинного пробою. Поодинокий фотон в такому режимі здатний викликати лавинний пробій. Саме струм пробою і дозволяє зареєструвати акт поглинання фотона. Оскільки даний режим не є стандартним, існує достатньо велика кількість параметрів схеми ввімкнення, зміна яких дає можливість досягти покращення характеристик приймача фотонів в цілому.

Технологія квантової криптографії, основана на квантових властивостях світла, дозволяє передавати по незахищеному каналу зв'язку випадкову послідовність біт таким чином, що втручання зловмисника в процес передачі породжує додатковий шум в каналі і виявляється легітимними користувачами [1]. Одним із важливих елементів системи квантової розсилки ключа є детектор поодиноких фотонів.

Аналіз основних публікацій. В сучасних роботах розрізняють два основних підходи до розуміння квантового сигналу: поодинокі фотони і когерентні стани [2, 3]. Відомо декілька механізмів генерації поодиноких фотонів, зокрема, з використанням квантових точок [4] и спонтанного параметричного розсіювання [5].

Альтернативним є використання коротких лазерних імпульсів, які послаблені до критичного рівня так, що середнє число фотонів в них менше одиниці [2, 6]. В квантовій криптографії у зв'язку з цим часто

використовується термін «одна десята фотона», який означає, що одиночний фотон присутній в середньому лишень в одному із десяти часових відліків.

Основоположними принципами захисту даних в квантових лініях зв'язку є неможливість копіювання заздалегідь невідомого стану окремого квантового об'єкта і неможливість отримання будь-якої інформації про квантові стани цього об'єкта без їх пошкодження. Таким чином, гарантією захисту переданої інформації виступають фундаментальні закони квантової механіки. Багатьма експертами квантова криптографія розглядається як єдиний метод, здатний забезпечити реальний захист систем комунікацій. Ідеї і перспективи цього напряму досліджень виявилися настільки привабливими, що дослідницькі групи відразу ж почали активну роботу зі створення реально працюючих установок і пристроїв. На даний момент проблеми створення квантових систем зв'язку є актуальними, і ця область динамічно розвивається.

Для збільшення відстані і швидкості передачі необхідний пошук нових теоретичних підходів модифікацій протоколів квантової криптографії, що дозволяють ефективніше використовувати лазерні імпульси в якості джерел квантових станів і знижувати обмеження на співвідношення сигнал / шум

У квантової криптографії стійкість протоколів квантового розподілу ключів обґрунтовується теоретично. Таким чином квантова криптографія виводить на новий рівень стандарти захищеної передачі даних через відкриті канали зв'язку [7]. Проте, практична реалізація протоколів квантової криптографії на базі доступних на сьогоднішній день компонентів стикається зі значними труднощами.

Метою роботи є розробка нових протоколів квантового розподілу ключів, а також досягнення високого рівня їх криптографічної стійкості завдяки застосуванню чутливих детекторів поодиноких фотонів на основі лавинних фотодіодів.

Структурна схема квантово-криптографічної системи

При аналізі існуючих квантово-криптографічних систем можна виділити три основні види таких систем: з поляризаційним кодуванням, з фазовим кодуванням і часовим кодуванням. Чим більше параметрів безпеки дослідник накладає на систему і контролює їх, тим більшою мірою користувач може отримати рівень безпеки і захисту від зловмисника. При аналізі недоліки були виявлені в кожній системі. Тому при комбінуванні систем в один комплекс ми намагалися позбутися від таких негативних рис.

Перед розглядом структурної схеми слід ввести деякі фундаментальні поняття для квантової системи.

У даній системі ми вводимо поняття синхронізаційних та інформаційних фотонів. Інформаційний фотон - носій інформації, який передає основну (корисну) інформацію.

Синхронізаційний фотон - це фотон, який необхідний для синхронізації дій відправника і отримувача і є точкою відліку при передачі ключовий послідовності. Необхідно підкреслити необхідність і корисність даного кроку: якщо зловмисник якимось чином і проникне в канал передачі інформації, то, не знаючи попередньої домовленості учасників передачі, він жодним чином не відрізнить інформаційний фотон від синхронізаційного.

Отже, перейдемо до розгляду структурної схеми комплексу, яка представлена на рис. 1.

Як показано на рис. 1, система має один напівпровідниковий діодний лазер, що використовується для генерації інформаційного і синхронізаційного фотонів.

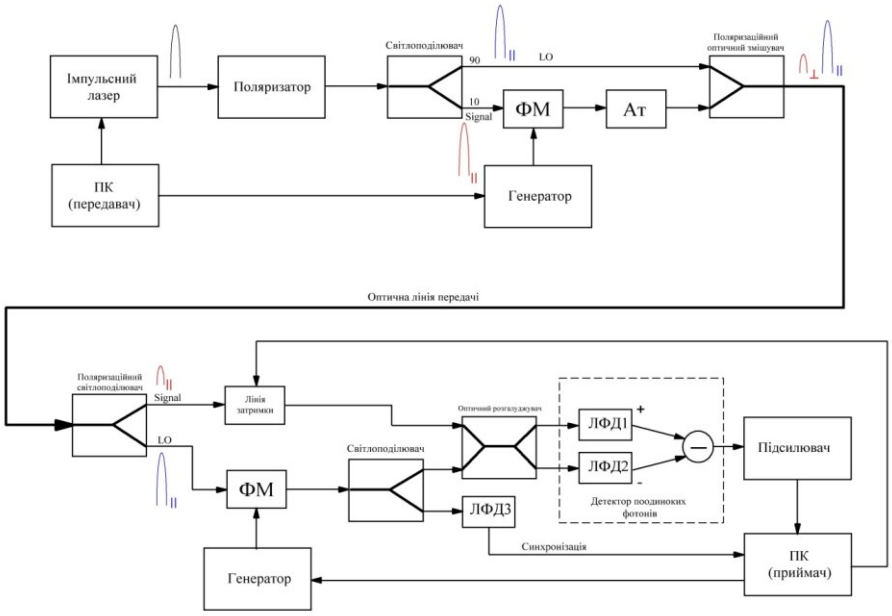


Рис. 1. Структурна схема криптографічної системи

Звичайно, лазер повинен бути термостабілізованим. З персонального комп'ютера для початку і завершення генерації випромінювання на лазер подаються керуючі сигнали. Після поляризатора імпульс лазерного випромінювання потрапляє на світлоподілювач 90/10. Сигнал з більшою потужністю називають

локальним осцилятором (local oscillator, LO). Один із світлових сигналів використовується для синхронізації, а інший – є інформаційним. Після фазового модулятора встановлений атенюатор, який послаблює пучок, і забезпечує необхідну ступінь однофотонності. Після атенюатора ми отримали «живий матеріал», з яким можна працювати і з яким можна задавати потрібні параметри. Потім випромінювання потрапляє на поляризаційний оптичний змішувач і передається в оптичну лінію зв'язку. На приймальній стороні здійснюються зворотні дії. Сигнал поступає на поляризаційний світлоподілювач, де здійснюється розподіл інформаційного і синхронізаційного фотонів.

Слід зауважити, що час приходу обох сигналів на приймач різний і його необхідно компенсувати. Обидва сигнали потрапляють на поляризаційний світлоподілювач і, оскільки вони мають ортогональну поляризацію, проходять знову по різним плечам інтерферометра. Але тепер пучок, який проходив по короткому плечу буде проходити по довгому плечу, і навпаки для іншого пучка. Приймач вмикає свій фазовий модулятор (ФМ), який так само як і на стороні передавача, генерує відповідний зсув фази, який необхідний для отримання інформації шляхом детектування. Приймач надає фазовий зсув своїм модулятором локальному осцилятору після чого сигнал локального осцилятора потрапляє в лінію затримки, де відбувається компенсація часової різниці надходження між корисним сигналом та сигналом локального осцилятора. Після цього обидва промені потрапляють до поляризаційного оптичного розгалужувача, який підключений до детектора поодиноких фотонів.

Перед початком передачі ключової послідовності учасники інформаційного обміну проводять попередню домовленість. У даній системі передавачу і отримувачу необхідно домовитися про фази фотона, який генерує передавач, і задання часових проміжків між парами синхронізаційних фотон - інформаційний фотон. Може виникнути питання, навіщо потрібно задавати послідовність фази фотонів, які будуть генеруватися передавачем.

У даній гібридній системі ми використовуємо прогнозування в часовій і фазовій області. Передавач і отримувач знають технологічні характеристики системи і таким чином можуть спрогнозувати, яку фазу ми отримаємо на виході. Якщо зловмисник перехопить такий фотон і застосує атаку типу вимірювання - пересилання, то ця спроба підробки ключа провалиться, оскільки він не знає, на який кут повороту повинна повернутися фаза. Також в системі велику роль відіграє час і часові затримки, про які зловмисник, до речі, не знає нічого. І якщо він і перехопить хоч частину ключової послідовності, то точно не зможе сказати, де інформаційні біти (фотони), а де синхронізаційні. Отже, після попередньої домовленості сторони інформаційного обміну починають передачу ключової послідовності.

Квантово-криптографічний система з можливостями прогнозування жорстко закріплює параметри фотона і дозволяє ними керувати, забезпечуючи тим самим підвищення секретності ключової послідовності. Звичайно, квантові криптографічні системи зв'язку не є панацеєю від витоку інформації, але надають достатній рівень захисту для використання в мережах зв'язку.

Приймач поодиноких фотонів на основі лавинних фотодіодів

Найбільш близьким для вирішення даної задачі є пристрій реєстрації поодиноких фотонів з використанням лавинних фотодіодів (ЛФД) [8 – 10, 13]. При цьому на зворотно зміщений лавинний фотодіод подається напруга, що перевищує напругу пробою ЛФД на величину ΔU. Пробій фотодіода не відбувається до тих пір поки в області сильного електричного поля не з'явиться термо- або фотогенерований носій електричного заряду. Тоді у фотодіоді за рахунок лавинного помноження цього заряду виникає імпульс струму. Помноження заряду буде відбуватися до тих пір, поки напруга на діоді не зменшиться до величини, меншої напруги пробою. Між струмом, що протікає через ЛФД під час пробою, і ΔU існує прямопропорційна залежність, тому і середня амплітуда імпульсів, що формуються на резисторі навантаження, пропорційна величині ΔU. Однак а процесі роботи ЛФД напруга його пробою змінюється із-за зміни параметрів навколишнього середовища і умов реєстрації оптичного випромінювання. При цьому змінюється і величинаΔU, від якої залежать такі характеристики фотодіода як квантова ефективність реєстрації, швидкість підрахунку імпульсів та ін. Величина ΔU також може змінюватися із-за нестабільності напруги джерела живлення. Тому для стабільної роботи ЛФД необхідно підтримувати постійне значення ΔU.

Задача стабілізації ΔU вирішується за допомогою функціональної схеми, зображеної на рис. 2.

За допомогою джерела живлення встановлюється напруга живлення фотодіода вище його напруги пробою. Під дією оптичного випромінювання в фотодіоді виникає лавинний пробій і через резистор навантаження протікають імпульси струму, які поступають на вхід підсилювача П1. Після підсилення імпульси поступають на входи компараторів К1 і К2. Поріг амплітудної дискримінації К1 вибирається над рівнем власних шумів підсилювача. Поріг амплітудної дискримінації К2 вибирається таким чином, щоб швидкість підрахунку імпульсів на виході компаратора К1 була в n раз більшою, ніж на виході К2. З виходу К1 імпульси поступають на вхід D5 мікроконтролера MCU (ESP8266). З виходу К2 імпульси поступають на вхід D6 мікроконтролера MCU. Коли мікроконтролер нараховує задане число N імпульсів, на його виході формується відповідний сигнал для ЦАП (MCP4728).

Дані з виходів D1 – D4 поступають на чотирьох-канальний цифро-аналоговий перетворювач ЦАП, що перетворює цифровий сигнал в напругу керування джерелом живлення. Якщо напруга ЦАП вища деякого заданого значення, то напруга джерела живлення ЛФД зменшується, якщо нижча – збільшується. Таким чином здійснюється постійне підналагодження напруги ΔU. Задавати значення порогів амплітудної дискримінації компараторів та контролювати значення встановлених параметрів можна з допомогою

персонального комп'ютера (ПК), що зв'язується з мікроконтролером бездротовою мережею WiFi, або дисплея Nextiion, що оснащений тачскріном.

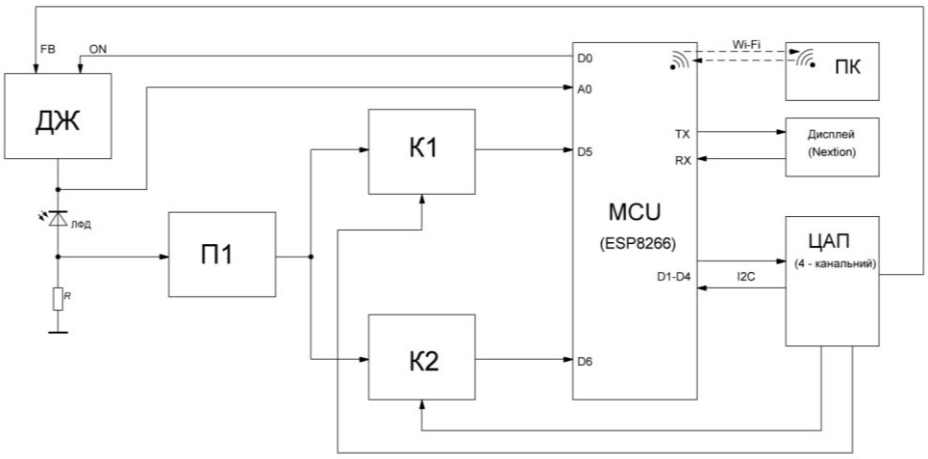


Рис. 2. Функціональна схема пристрою реєстрації поодиноких фотонів

При роботі ЛФД в режимі лічильника фотонів амплітудний розподіл вихідних імпульсів фотодіода залежить від ΔU. Під амплітудним розподілом розуміють залежність ймовірності появи імпульсів від величини амплітуди. Така відмінність амплітуд імпульсів пов'язана зі статичним характером процесу помноження носіїв заряду. Для однакових амплітуд розподіли будуть однаковими і ймовірність перевищення або не перевищення імпульсами деякого порогу амплітудної дискримінації. Тому, якщо в процесі вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання будуть контролюватися ймовірності перевищення імпульсами деякого порогу амплітудної дискримінації, то можна здійснити стабілізацію величини ΔU по відхиленню ймовірності перевищення імпульсами деякого порогу амплітудної дискримінації від наперед заданого значення. Якщо на виході фотоприймача загальне число імпульсів рівне N, то із них тільки N1 імпульсів перевищать заданий поріг амплітудної дискримінації. Тоді ймовірність перевищення порогу може бути визначена за співвідношенням N1/N [14, 15]. Контролюючи це співвідношення, можна зробити висновок про зміну величини ΔU. Якщо ΔU змінилась, то автоматично здійснюється її підналагодження. При збільшенні співвідношення N1/N величину ΔU необхідно зменшити, а при зменшенні N1/N – збільшити ΔU.

Виміряні значення квантової ефективності реєстрації від величини шумів в перерахунку на один імпульс становлять 30 ÷ 45%. Ймовірність реєстрації і рівень темнового шуму визначались сумарною зворотною напругою зміщення ЛФД, яка змінювалась при проведенні вимірювань.

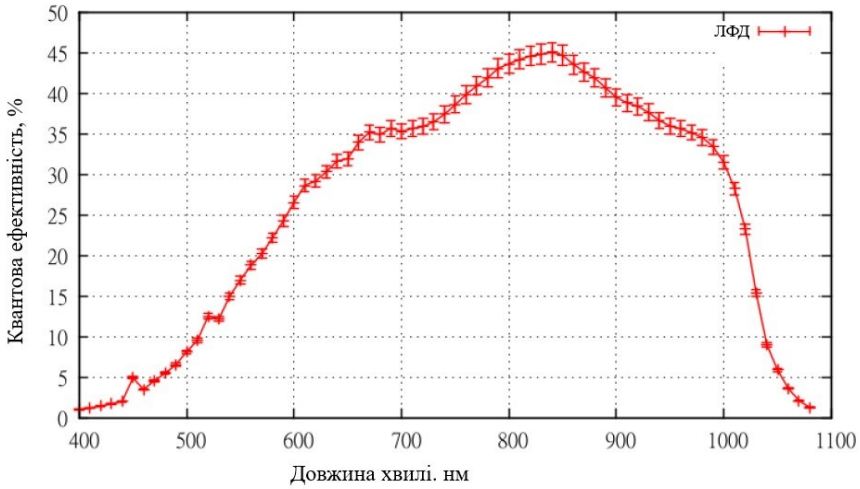


Рис. 2.7. Залежність квантової ефективності від довжини хвилі

Висновки

Розроблений пристрій реєстрації поодиноких фотонів підвищує точність вимірювання інтенсивності випромінювання з допомогою лавинного фотодіода, що працює в режимі лічильника фотонів, за допомогою стабілізації величини різниці між напругою живлення і напругою пробою лавинного фотодіода без втрат часу вимірювання. За допомогою даної системи можна проводити вимірювання при кімнатних температурах без використання енергозатратних засобів охолодження. Темнові шуми і температурна нестабільність враховані у значенні величини напруги *ΔU*. Розроблений пристрій дозволяє підвищити квантову ефективність реєстрації до 45 %.

Література

1. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. Proceedings of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing. 1984. Pp. 175–179.

2. Егоров В.И., Латыпов И.З., Рупасов А.В., Глейм А.В., Чивилихин С.А. Установка квантовой криптографии с источником одиночных фотонов, основанным на явлении спонтанного параметрического рассеяния света. Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 25 - 29.

3. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography. Rev. Mod. Phys. 2002. Vol. 74 , № 1. Pp. 145–190.

4. Unitt D.C., Bennett A.J., Atkinson P. et.al. Quantum dots as single-photon sources for quantum information processing. Journal of optic. 2005. Vol. 7, № 7. Pp. 129–134.

5. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al. The security of practical quantum key distribution. Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. Pp. 1301–1350.

6. Калачев А.А., Калашников Д.А., Калинкин А.А., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Шкаликов А.В. Бифотонная спектроскопия кристалла рубина. Учен. зап. Казан. гос. ун-та. Сер. физ.-матем. науки. 2008. Т. 150. Кн. 2. С. 125–130.

7. Корченко О.Г., Васіліу Є.В., Гнатюк С.О. Сучасні квантові технології захисту інформації. Науково-технічний журнал «Захист інформації». 2010. № 1. С. 77–89.

8. Курочкин Ю.В., Курочкин В.Л. Детекторы одиночних фотонов на основе лавинних фотодиодов. 2011. Т. 54, №2. С. 202-205.

9. Курочкин В.Л., Зверев А.В., Курочкин Ю.В., Рябцев И.И., Неизвестный И.Г. Применение детекторов одиночных фотонов для генерации квантового ключа в экспериментальной оптоволоконной системе связи. Автометрия. 2009. Т. 45, № 4. С. 110–119.

10. Trew R.T., Stucki D., Gautier J.-D. Free-running InGaAs/InP avalanche photodiode with active quenching for single photon counting at telecom wavelengths. Appl. Phys. Lett. 2007. Vol.91. P. 201114.

11. Trifonov A., Subacius D., Berzanskis A., Zavriev A. Single photon counting at telecom wavelengths and quantum key distribution. Journ. Mod. Optics. 2004. Vol. 51, № 9-10. P.1399-1415.

12. Фотоприемники и фотоприемные устройства. Каталог ОАО «Кварц» . 2000-2001. С.61.

13. Болонна Є.І., Шпатар П.М. Приймач одиночних фотонів систем квантової криптографії. Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2017. №2(46). С. 74 – 79.

14. Bolonna E., Shpatar P. Device for registration of single photons. Scientific Light (Wroclaw, Poland). 2017. Vol.1, №5. P. 143-145.

15. Bolonna I. I., Shpatar P. M. Experimental scheme of single photon detection for quantum cryptography. Proceedings of 12 International conference "Correlation optics 2015", Chernivtsi, September 14-18, 2015. Chernivtsi, Ukraine.

References

1. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. Proceedings of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing. 1984. Pp. 175–179.

2. Egorov V.I., Latypov I.Z., Rupasov A.V., Gleim A.V., Chivilikhin S.A. Ustanovka kvantovoi kriptografii s istochnikom odinochnykh fotonov, osnovannym na yavlenii spontannogo parametricheskogo rasseyaniya sveta. Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki. 2012. № 1 (77). S. 25 - 29.

3. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography. Rev. Mod. Phys. 2002. Vol. 74 , № 1. Pp. 145–190.

4. Unitt D.C., Bennett A.J., Atkinson P. et.al. Quantum dots as single-photon sources for quantum information processing. Journal of optic. 2005. Vol. 7, № 7. Pp. 129–134.

5. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al. The security of practical quantum key distribution. Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. Pp. 1301–1350.

6. Kalachev A.A., Kalashnikov D.A., Kalinkin A.A., Mitrofanova T.G., Samartsev V.V., Shkalikov A.V. Bifotonnaya spektroskopiya kristalla rubina. Uchen. zap. Kazan. gos. un-ta. Ser. fiz.-matem. nauki. 2008. T. 150. Kn. 2. S. 125–130.

7. Korchenko O.G., Vasiliu Є.V., Gnatyuk S.O. Suchasni kvantovi tekhnologiї zakhistu informatsiї. Naukovo-tekhnichnii zhurnal «Zakhist informatsiї». 2010. № 1. S. 77–89.

8. Kurochkin YU. V., Kurochkin V. L. Detektory odinochnikh fotonov na osnove lavinnikh fotodiodov. 2011. T. 54, №2. S. 202-205.

9. Kurochkin V.L., Zverev A.V., Kurochkin YU.V., Ryabtsev I.I., Neizvestnyi I.G. Primenenie detektorov odinochnykh fotonov dlya generatsii kvantovogo klyucha v ehksperimental'noi optovolokonnoi sisteme svyazi. Avtometriya. 2009. T. 45, № 4. S. 110–119.

10. Trew R.T., Stucki D., Gautier J.-D. Free-running InGaAs/InP avalanche photodiode with active quenching for single photon counting at telecom wavelengths. Appl. Phys. Lett. 2007. Vol.91. P. 201114.

11. Trifonov A., Subacius D., Berzanskis A., Zavriev A. Single photon counting at telecom wavelengths and quantum key distribution. Journ. Mod. Optics. 2004. Vol. 51, № 9-10. P.1399-1415.

12. Fotopriemniki i fotopriemnye ustroistva. Katalog OAO «Kvarts» . 2000-2001. S.61.

13. Bolonna Ye.I., Shpatar P.M. Priimach odinochnikh fotoniv sistem kvantovoi kriptografii. Naukovi zapiski Ukrainskogo naukovo-doslidnogo institutu zVyazku. 2017. №2(46). S. 74 – 79.

14. Bolonna E., Shpatar P. Device for registration of single photons. Scientific Light (Wroclaw, Poland). 2017. Vol.1, №5. P. 143-145.

15. Bolonna I. I., Shpatar P. M. Experimental scheme of single photon detection for quantum cryptography. Proceedings of 12 International conference "Correlation optics 2015", Chernivtsi, September 14-18, 2015. Chernivtsi, Ukraine.

Надійшла / Paper received : 20.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-33-38
УДК 004.891

В.М. ДЖУЛІЙ, І.В. МУЛЯР, В.С. ОРЛЕНКО, В.Ю. ТІТОВА, В.А. АНІКІН
Хмельницький національний університет

СИМЕТРИЧНА КРИПТОСИСТЕМА З НЕЛІНІЙНИМ ШИФРУВАННЯМ ТА МОЖЛИВІСТЮ КОНТРОЛЮ ШИФРОТЕКСТУ З МЕТОЮ МАСКУВАННЯ

В статті запропонована проста симетрична перестановочна криптосистема, перестановки в якій відбуваються на основі потокової генерації випадкових чисел. Наведений криптографічний алгоритм, в зв'язку з нелінійністю процесу шифрування, здатний шифрувати одні і ті ж блоки інформації по-різному. Дана властивість може бути використана для формування шифротексту конкретного вигляду та, як наслідок, для прихованої передачі шифрованих повідомлень і повного, або часткового маскування факту криптографічного впливу.

Підстановочно-перестановочні алгоритми достатньо розповсюджені на сьогоднішній день. Вони зарекомендували себе як надійні криптостійкі шифри, що склали серйозну конкуренцію ітеративним математичним шифрам, на базі мережі Фейстеля, та поступово все більше та більше витісняють їх, займаючи їх місце.

В статті запропонований алгоритм шифрування, який має просту структуру та легкий в реалізації, але при цьому, прогнозовано, він є достатньо стійким для криптоатак, має високу швидкість роботи та використовує всі переваги сучасних алгоритмів шифрування та має потенціал для маскування шифрованих даних.

Розроблено схему шифрування, в якій перестановки відбуваються у випадковому порядку, та, як наслідок, стає можливою ситуація, коли одному відкритому тексту при одному і тому ж ключі відповідає безліч шифротекстів, що серйозно ускладнює роботу криптоаналітиків, ускладнюючи аналіз та злом шифру, а також суттєво збільшує область прикладного використання даної криптосистеми. Також дана криптосистема має стеганографічний потенціал, оскільки нелінійність, яка породжує варіативність шифротекстів, дозволяє, фактично, один і той ж самий байт зашифрувати десятками, або навіть сотнями комбінацій.

Запропоновано новий підхід до створення шифрувальної варіативності та випадкового вибору, що дає можливість модифікації вже існуючих алгоритмів шифрування.

Ключові слова: криптографія, стеганографія, симетрична криптосистема, перестановочний шифр, випадкова генерація, захист інформації.

V.M. DZHULIY, I. V. MULYAR, V.S. ORLENKO, V. YU. TITOVA, V. A. ANIKIN
Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

SYMMETRIC CRYPTOSYSTEM WITH NONLINEAR ENCRYPTION AND THE POSSIBILITY OF CONTROL OF CIPHERTEXT FOR CONCEALMENT

The article proposes a simple symmetric permutation cryptosystem, in which permutations occur based on streaming generation of random numbers.

Substitution-permutation algorithms are quite common today. They have proven to be reliable crypto-strong ciphers that have seriously competed with iterative mathematical ciphers, based on the Feistel network, and are gradually displacing them more and more, taking their place.

The aim of the article is to propose an encryption algorithm that has a simple structure and is easy to implement. At the same time, it is estimated to be quite resistant to crypto attacks. This encryption algorithm has a high speed and uses all the advantages of permutation encryption algorithms.

Developed an encryption scheme in which permutations occur randomly, and as a result, a situation becomes possible when one plaintext with the same key corresponds to many ciphertexts, which seriously complicates the work of cryptanalysts, complicating the analysis and cracking of the cipher, and significantly increases the scope of application of this cryptosystem. Also, this cryptosystem has steganographic potential, because the nonlinearity that creates the variability of ciphertexts, allows the same byte to encrypt dozens or even hundreds of combinations.

This paper has clearly shown a new approach to the creation of encryption variability and random selection is proposed. It makes possible to modify existing encryption algorithms.

Key words: cryptography, steganography, symmetric cryptosystem, permutation cipher, random generation, information protection.

Вступ

У всі часи люди намагалися захищати інформацію, яку вважають важливою, постійно розвиваючи та удосконалюючи засоби для її захисту. Стислий Оксфордський словник англійської мови визначає криптографію як «мистецтво написання або розв'язування кодів". Це історично точно, але воно не враховує сучасної розповсюдженості галузі та її сьогоденних наукових основ [1]. На сьогоднішній день криптографія має вкрай широкий спектр застосувань, починаючи від класичного захисту інформації при зберіганні, чи передачі, закінчуючи контролем цілісності повідомлень та цифровими підписами, для верифікації даних.

Також здавна люди намагались приховувати ту чи іншу інформацію, різноманітними способами маскуючи її. Такі починання згодом переросли в науку під назвою стеганографія, що на сьогоднішній день широко використовується в сфері захисту інформації.

У розрізі цього, не видається дивним що здавна і до сьогодні люди працюють над розробкою нових і нових криптосистем: шифр Цезаря змінили криптосистеми простої заміни, їх, в свою чергу, витіснили поліалфавітні системи, на кшталт шифрів Гронсфельда та Віженера [2], а їх, пізніше, – ітеративні блочні шифри, на основі мережі Фейстеля, яскравим прикладом яких є DES [3], різноманітні модифікації якого широко використовуються до сьогоднішнього дня.

Разом із розвитком криптосистем, невпинно розвивався і криптоаналіз, накопичений інструментарій якого [4], у поєднанні з технічними можливостями сучасної обчислювальної техніки, задає вкрай високу планку вимог для сучасної криптографії вцілому та безпосередньо для використовуваних криптосистем.

На сьогоднішній день одними з найбільш захищених криптосистем у світі є шифри, на основі підстановочно–перестановочних систем, наприклад SQUARE та Rijndael, останній відомий на широкий загал як Advanced Encryption Standard (AES) [3, 5].

З огляду на це, можна стверджувати що підстановочно–перестановочні системи, спроектовані таким чином, щоб максимально використовувати сучасні обчислювальні потужності та досягати високої ентропії при шифруванні, здатні надійно захищати інформацію та є стійкими до сучасних криптоатак.

Також, безумовно, важливою складовою захисту інформації є непомітність. Логічно, що інформацію, яка виглядає цілісно, осмислено, без слідів того що в ній щось приховано, або зашифровано, навряд чи хто буде досліджувати без суттєвих на те підстав. Саме через це в сучасному світі, у сфері кібербезпеки, все частіше використовується стеганографія – наука, що до надає інструментарій для приховування однієї, умовно «таємної», інформації всередині іншої – публічної, тієї що не представляє для сторонніх осіб жодного інтересу. В зв'язку з цим, виникає великий попит на алгоритми, які підходять до захисту комплексно: вони здатні як захистити інформацію криптографічно, так і, повністю, або частково, замаскувати сам факт того що деяка інформація була прихована.

Огляд літературних джерел

Симетричні криптосистеми давно відомі науці та є в достатній мірі вивчені та проаналізовані. В зв'язку з цим, дослідження симетричних систем шифрування знайшло відбиток у великій кількості наукових статей та літературі. Дані напрацювання обов'язково слід враховувати при розробці криптосистеми.

Симетричні криптосистеми на протязі багатьох століть використовувались для захисту інформації та «закриття» важливої інформації від несанкціонованого використання [6, 7, 8]

Симетричні алгоритми шифрування перетворюють деяку конфіденційну інформацію, на основі криптографічного ключа, у шифровану форму. Зворотне перетворення, яке відновлює вхідну інформацію, відбувається при зворотному виконанні алгоритму, за умови, що у вас є такий цей ж самий ключ [8]. Сучасні симетричні криптосистеми, хоч і є більш витонченими, математично та комбінаторно обґрунтованими, все одно, як правило дотримуються таких принципів.

Також важливою складовою при розробці криптосистеми є оцінка інструментарію криптоаналізу, та сучасні можливості у сфері «взлому» систем шифрування. Для створення криптостійкого алгоритму слід на етапі проектування враховувати те, яким чином він буде поводитись під час криптоатаки та забезпечити достатній запас міцності та стійкості [9 - 11].

Постановка задачі

Необхідно створити простий у реалізації криптостійкий перестановочний симетричний алгоритм шифрування, який би відповідав сучасним вимогам безпеки та значно ускладнював існуючі способи криптоаналізу, при цьому з можливістю корегування вихідного шифротексту.

Основна ідея даного алгоритму полягає в тому, що P-блок, за яким відбуватиметься перестановка, для кожного байту обирається випадково, на основі генератора випадкових чисел. Такий підхід значно ускладнить будь-який статистичний криптоаналіз, оскільки будь-які закономірності між відкритими байтами та зашифрованими будуть відсутні. Потокова випадкова генерація коефіцієнта перестановки дозволить досягти неоднорідності шифрування та відсутності закономірностей у ньому.

Також, через відсутність складної ітеративності, даний алгоритм повинен мати високу швидкість роботи, порівняно з аналогами.

Основна частина

Відповідно до поставленої задачі, криптосистема повинна відповідати сучасним вимогам безпеки, бути надійною та придатною для практичного використання, забезпечуючи високу надійність, а отже, даний шифр повинен бути стійким перед інструментарем сучасного криптоаналізу.

Одною з головних потужностей криптоаналізу на сьогодні є обчислювальна потужність комп'ютерної техніки, яка серйозно збільшується з кожним новим поколінням. Фактично будь-який симетричний шифр можливо взламати атакою «грубої сили», тобто повним перебором всіх можливих криптографічних ключів, та почерговими спробами розшифрування кожним з них. До сьогоднішнього дня даний метод – найбільш універсальний серед всіх існуючих, за умови що нам відомо тип алгоритму та принцип його роботи, при цьому не важко здогадатись, що ККД даного методу є вкрай низьким.

Для оцінки реальності загрози атаки грубої сили вводиться термін «практичний час», як деяка відповідність теоретичному часу, за який машина прогнозовано зможе підібрати ключ, до часу збереження актуальності та цінності прихованої інформації. Простіше кажучи, якщо умовна Єва перехопила зашифроване повідомлення компанії конкурента, і на атаку грубої сили, прогнозовано буде затрачено 50 років, то такий час можна вважати непрактичним, адже за 50 років розшифроване повідомлення дасть Єві мінімум користі. При цьому обов'язково слід врахувати той факт, що якщо на сьогоднішній день прогнозований час атаки й складатиме 50 років, то абсолютно не факт, що через кілька років, з урахуванням нових технологій та потужностей, цей час не складатиме 50 годин, чи навіть хвилин. Окрім цього на сьогоднішній день все більшої популярності набувають розподілені обчислення, що переганяють за швидкістю роботи навіть передові суперкомп'ютери [12].

Таким чином запас міцності, в контексті стійкості криптосистеми до атаки грубої сили, як одна з базових характеристик надійності шифру повинна враховувати не лише обчислювальні потужності, існуючі сьогодні, а і їх прогнозоване зростання, яке є неминучим.

Слід враховувати й безліч інших існуючих криптоатак, такий як, наприклад, атака на основі перехопленого відкритого тексту, атака на основі підібраного відкритого тексту, диференціальний криптоаналіз та інші існуючі підходи.

Головна сила запропонованої криптосистеми – нелінійність та рандомізація алгоритму, саме це і повинно забезпечити його високу криптостійкість. В цілому, ідея полягає у створенні кількох можливих варіантів роботи шифру на тому, чи іншому етапі його виконання, серед яких випадковим чином обирається один. Для можливості дешифрування, позначається лише індекс обраного варіанту, який не дає криптоаналітику жодної додаткової інформації про те, що за ним стоїть.

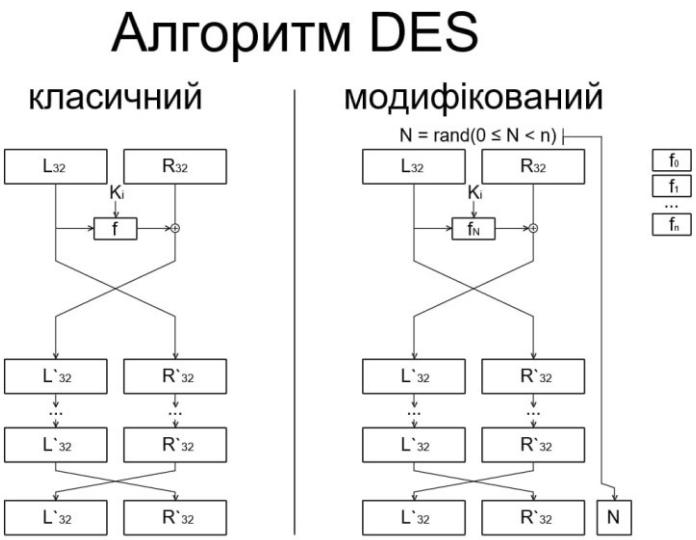


Рис. 1. Схема звичайного та модифікованого алгоритму DES

Даний підхід можна продемонструвати на прикладі алгоритму DES (Рис. 1).

В класичному представлені даного алгоритму у нас є одна функція, яка на основі раундового ключа та першого підблоку мережі Фейстеля, розміром 48 та 32 біта, відповідно, та повертає новий 32-бітний блок даних. Проте давайте змоделюємо ситуацію, при якій в даному алгоритмі у нас не одна функція, а, до прикладу, їх вісім. Кожна з цих функцій також прийматиме на вхід два блока у 48 та 32 біт та повертатиме, на їх основі, новий 32-бітний блок, при цьому кожна з них буде робити це по-різному. Якщо точніше, вони будуть і далі працювати за схемою класичної функції DES, проте, кожна з цих 8 функцій матиме деякі особливості: одна, наприклад, по-іншому розширюватиме вхідний блок, друга – перед розширенням проводитиме циклічний зсув вхідного блоку на деяке число, третя – проводитиме аналогічний зсув, але вже після розширення, четверта – залишиться у класичному вигляді, без змін, а п'ята – додаватиме 27, за модулем 256, до кожного парного байту після розширення вхідного блоку і так далі. Як результат – кожна функція, в цілому, подібна до інших та кожну з них можна без проблем замінити іншою, проте 32-бітні блоки які буде повертати та, чи інша функція, як правило, будуть різні.

Тепер нам залишається лише незначно модифікувати загальний алгоритм шифрування: при генерації ключа, додатково, випадковим чином цим функціям буде присвоєно індекси від 0 до 9. Інформація про дані індекси та їх відповідності буде частиною секретного ключа. А при шифруванні, перед першим раундом кожного блоку, ми обиратимемо випадкове ціле число в діапазоні $[0; 8)$, яке і вказуватиме яку функцію з переліку ми використовуватимемо у наступних 16 раундах. Інформацію про те яка функція була використана можемо записати у вигляді 3-бітної комбінації в кінці, після зашифрованого 64-бітного блоку.

При такій модифікації алгоритму шифрований текст розшириться на n біт, де $n = \frac{N_{\text{повідомлення}} \times 67}{64}$, тобто, приблизно, на 4,5%.

В описаному випадку, при перехопленні шифрованого повідомлення, у криптоаналітика будуть на руках самі шифроблоки, а також індекси використаних функцій, без будь-якої важливої інформації, звичайно, якщо криптоаналітик знає принцип роботи даної модифікації. Проте в даній ситуації спеціаліст зможе однозначно сказати чи однакові функції були використані, в тому, чи іншому випадку, чи ні, елементарно зрівнявши ці самі індекси вкінці блоків. На основі даної інформації він зможе згрупувати блоки, в яких були використані однакові функції та досліджувати їх окремо.

Для того щоб позбавити криптоаналітика такої можливості, введемо ще одну зміну: індексів буде більше ніж самих функцій. На описаному вище прикладі, це можна зробити двома шляхами: або зменшити кількість функцій, тоді в нас буде, наприклад, 4 функції та 8 індексів, або збільшити кількість індексів, тоді при 8 функціях ми матимемо 16 індексів.

При генерації нового ключа, як і раніше, ми випадково генеруємо та записуємо відповідності між функціями та індексами, проте вже не у відношенні 1:1, а у відношенні 1:m, де одній функції відповідатиме кілька індексів. При шифруванні тепер ми кидатимемо монетку двічі: перший раз – щоб вибрати функцію, другий – щоб обрати один індекс, серед всіх, пов‘язаних з даною функцією.

Слід зазначити що дані числа краще обирати рівним 2^n, а кількість функцій, рекомендовано, має бути кратною кількості індексів, при чому вони повинні бути рівномірно розподілені між функціями. Це дозволить в повній мірі, без надлишковості, використовувати діапазон значень, при шифруванні, а також забезпечить однакову ймовірність випадання функцій.

Тепер, перехопивши повідомлення, криптоаналітик не зможе однозначно сказати чи були використані однакові функції в блоках з різними індексами, адже це може бути як інший ідентифікатор тієї ж самої функції, так й ідентифікатор іншої функції.

Також звідси витікає цікава властивість даного алгоритму: зашифрувавши одне і те ж саме повідомлення, використовуючи один і той ж самий ключ, ми отримаємо різні шифротексти, оскільки тепер те як буде зашифровано той чи інший блок, залежатиме від випадкового показника, при шифруванні. Отже, криптоаналітик, перехопивший n зашифрованих повідомлень, не зможе однозначно виявити які серед них будуть ідентичними після дешифровки.

Приклад, наведений на основі криптографічного алгоритму DES, наглядно та в повній мірі демонструє принципи роботи, на базі яких пропонується створити окрему криптосистему.

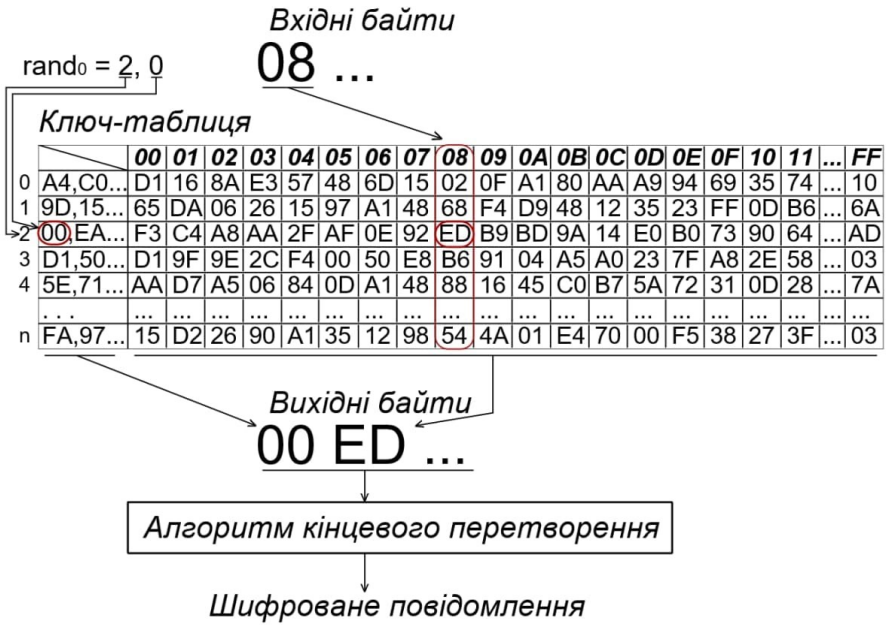
Навіть у вигляді модифікації до вже існуючого алгоритму, така нелінійність, наявність кількох «сценаріїв» роботи, серед яких обирається випадковий, дозволяє значно ускладнити роботу криптоаналітиків та понизити ефективність машинного криптоаналізу. Причому слід зазначити, що в описаній модифікації зазначена варіативність була додана лише для раундових функцій, хоча це зовсім не єдиний аспект, де даний підхід можна було б застосувати, навіть у випадку шифру DES.

Таким чином, аналогічно до наведеного прикладу ми можемо спроектувати окремий алгоритм, в якому описаний принцип нелінійності буде не модифікацією, а основою його роботи.

Логікою шифрування в даному алгоритмі буде заміна одного байту на інший, відповідно до деякої поліалфавітної таблиці перестановок. Дана таблиця міститиме в собі n рядків та 256 стовпців, якщо за умовний блок даних ми візьмемо один байт. В кожному рядку буде послідовність від 0 до 255, перемішана випадковим чином. Кількість рядків, а відповідно «алфавітів перестановки», може бути якою завгодно.

Кожному рядку, точно як і функції, у прикладі з DES, присвоюється m випадкових двійкових ідентифікаторів. Розрядність цих ідентифікаторів також може бути обрана різна, проте вона повинна бути однаковою для всіх ідентифікаторів. Від обраної розрядності залежатиме, по-перше, кількість алфавітів, яку ми можемо визначити, наприклад якщо розрядність дорівнюватиме двом, то максимум у нас може бути 4 алфавіти, а з урахуванням рекомендації використовувати не менше двох ідентифікаторів на один алфавіт – всього 2. По-друге, від розрядності залежатиме те, наскільки збільшиться шифрований текст, порівняно з вхідним повідомленням. Якщо розрядність ідентифікатора буде рівною розрядності нашого блоку даних, а у нашому випадку – це 8 біт, то шифроване повідомлення буде вдвічі більше за вхідне. Чим менша розрядність ідентифікатора, по відношенню до розміру блоку даних, тим менше буде збільшення вихідного повідомлення при шифруванні і навпаки.

Дана таблиця замін, разом із відповідними ідентифікаторами, складатиме собою секретний ключ. Для її компактного запису можна використовувати різноманітні технології стиснення.



		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10	11	...	FF
0	A4,C0...	D1	16	8A	E3	57	48	6D	15	02	0F	A1	80	AA	A9	94	69	35	74	...	10
1	9D,15...	65	DA	06	26	15	97	A1	48	68	F4	D9	48	12	35	23	FF	0D	B6	...	6A
2	00,EA...	F3	C4	A8	AA	2F	AF	0E	92	ED	B9	BD	9A	14	E0	B0	73	90	64	...	AD
3	D1,50...	D1	9F	9E	2C	F4	00	50	E8	B6	91	04	A5	A0	23	7F	A8	2E	58	...	03
4	5E,71...	AA	D7	A5	06	84	0D	A1	48	88	16	45	C0	B7	5A	72	31	0D	28	...	7A
	. . .	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	FA,97...	15	D2	26	90	A1	35	12	98	54	4A	01	E4	70	00	F5	38	27	3F	...	03

Рис. 2. Схема шифрування

Схема шифрування даним методом показана на рис. 2 та в цілому подібна до описаної на прикладі DES: спочатку ми обираємо два випадкових числа, з яких перше – в діапазоні $[0; n)$, де n – кількість алфавітів, а друге – в діапазоні $[0; m)$, де m – кількість ідентифікаторів, відповідних даному алфавіту. Після цього ми заміняємо вхідний блок даних на вираз, що складається з обраного ідентифікатора та числа, що знаходиться в обраному алфавіті на позиції, номер якої відповідає числу, утвореного з блока вхідних даних. Тобто, якщо ми шифруємо 8-бітні блоки, і на вході, як приклад, отримали блок «10001010», що у десятковій формі відповідає числу 138, а випадкові числа випали 2 і 0, за умови, що вони відповідатимуть межам зазначених діапазонів, то шифрований вираз для даного блоку складатиметься з 0-го ідентифікатора 2-го алфавіту перестановок та числа, що знаходиться на 138-й позиції у 2-му алфавіті. Такі перетворення почергово проводяться для кожного блоку даних, до кінця відкритого повідомлення.

В прикладі з DES на цьому ми закінчували, проте в даному випадку не слід залишати шифроване повідомлення в такому вигляді, оскільки у обізнаного криптоаналітика, при перехопленні буде можливість проаналізувати однакові ідентифікатори та відповідно, на основі великої кількості повідомлень скласти деяку кореляцію. Щоб позбавити його такої можливості, ми використаємо два прийоми.

По-перше, ми додамо варіативності до принципу зчеплення ідентифікатора та блоку заміни. Це дозволить ускладнити розпізнавання ідентифікаторів та ускладнить криптоаналіз. Приклади зчеплень елементів продемонстровано на рис. 3.

По-друге, після формування вихідного масиву байт, після завершення замін, ми «змішаємо» його за допомогою алгоритму кінцевого перетворення. Найпростішим варіантом даного алгоритму може бути поблокове додавання за модулем 2, в режимі зчеплення блоків, де ключ та перший блок деяким чином формуються на основі таблиці. Даний алгоритм може бути реалізовано на основі мережі Фейстеля з невеликою кількістю раундів, на основі матричних перестановок, чи на основі будь-якого іншого існуючого алгоритму, що забезпечує надійне «розмиття».

Таким чином даний алгоритм буде стійким до атаки грубою силою, оскільки простим перебором відновити таблицю замін не можливо за практичний час, а за необхідності, розмір вхідного блока даних можна додатково збільшити. Кількість можливих варіантів перестановок для одного 8-бітного алфавіту складає 256!, а за умови що алфавітів багато, кількість можливих комбінацій забезпечує надійність ключа навіть з урахуванням розвитку технологій.

Слід зауважити, що при абсолютно випадковій генерації ключа, шифротекс, звісно, також вийде випадковий. При цьому, ми можемо піти від зворотнього: припустимо що в нас вже є шифротекст, який ми маємо отримати. Ми можемо згенерувати такий ключ, щоб при шифруванні конкретним способом, без викидання випадкових чисел, ми отримали необхідний нам шифротекст. При даному підході також з'являються додаткові вимоги до алгоритму кінцевого перетворення: він повинен мати змогу розшифрувати будь-який випадковий масив байт.

Рис. 3 Приклади зчеплення ідентифікатора та блоку заміни

Нелінійність алгоритму ускладнить машинний та людський криптоаналіз та затруднить статистичні дослідження.

Даний алгоритм також буде стійким на до атаки на основі відкритого тексту, оскільки, маючи на руках відповідне шифроване повідомлення, криптоаналітик матиме лише один з можливих варіантів шифротексту, при цьому криптоаналітик не матиме доступу до всіх інших можливих варіантів шифрування.

В цілому запропонований алгоритм представляє собою цікавий та перспективний метод криптографічного захисту, безумовно потребуючи розвитку та подальших досліджень. Окрім криптографічного, даний алгоритм представляє також стеганографічний інтерес, оскільки нелінійність, яка породжує варіативність шифротекстів, дозволяє, фактично, один і той ж самий байт зашифрувати десятками, або навіть сотнями комбінацій. Виходячи з цього, теоретично, можливо створити такий ключ, при якому деякий конфіденційний текст в зашифрованому вигляді представлятиме інший осмислений текст, що не викликатиме підозр. Даний аспект також потребує додаткових досліджень.

Висновки

Таким чином, алгоритми шифрування, що мають в собі елементи нелінійності, включають рівноможливі варіанти виконання, серед яких в процесі виконання обирається один, значно підвищують його стійкість та захищенність.

Запропонований алгоритм, який в повній мірі відповідає описаним принципам, проявляє цікаві властивості, а проведенні дослідження говорять про його достатню захищеність та стійкість.

Безумовно, наведені алгоритми потребують додаткового вивчення, проте вже на даному етапі можна говорити про те, що навіть модифікація вже існуючих алгоритмів, введення в них варіативних елементів, є легким способом підвищення їх надійності.

Окрім зазначеного, даний алгоритм може знайти розвиток у сфері стеганографії.

Літертура

1. Інформаційна безпека: навчальний посібник / [Ю. Я. Бобало, І. В. Горбатий, М. Д. Кіселичник, А. П. Бондарєв та ін.]; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю. Я. Бобала та д-ра техн. наук, доц. І. В. Горбатого. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 580 с.

2. Прикладна криптологія: системи шифрування : підручник / О. Г. Корченко, В. П. Сіденко, Ю. О. Дрейс. – К. : ДУТ, 2014. – 448 с.

3. Основы криптографии/ Г.В. Басалова. – М.: ИНТУИТ, 2016. - 283 с.

4. Cryptology and information security - past,present, and future role in society/ S. Bhattacharya. - International Journal on Cryptography and Information Security (IJCIS). – Vol. 9, No.1/2, 2019. – P. 13-36.

5. Муляр І.В. Ітераційно-геометричний метод для стійкого перцептуального хешування зображення / В. М. Джулій, Ю. П. Кльоц, І. В. Муляр, В. М. Чешун // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 1. – С. 76–79

6. Hybrid cryptographic technique using rsa algorithm and scheduling concepts/ M. Shankar, P. Akshaya// International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)/ Vol.6, No.6. – 2014. - p. 39-48

7. Комп'ютерна стеганографічна обробка й аналіз мультимедійних даних: підручник. / Г. Ф. Конахович, Д. О. Прогонов, О. Ю. Пузиренко. – Київ: «Центр учбової літератури», 2018. – 558 с.

8. Digital Watermarking and Steganography: Fundamentals and Techniques / Edited by Frank Y. Shih**. –** Taylor & Francis Group, 2017**. –** 293 p

9. The Evolution of Cryptology [Електронний ресурс]/ G. R. Souza. – California State University, San Bernardino, 2016. – режим доступу: https://core.ac.uk/reader/55336770

10. Cryptology and communication security [Електронний ресурс]/ Shri Kant. – Defense Science Journal. – Vol. 62. - №1. – режим доступу: https://core.ac.uk/reader/333719963

11. Криптоанализ шифрсистемы ACBF/ И. В. Боровкова, И. А. Панкратова. – Прикладная дискретная математика. Приложение, Томск. – 2019. – С. 90-93.

12. Захист інформаційних ресурсів: криптографічні та стеганографічні методи захисту даних. Посібник для викладачів, вчителів та студентів інформатичних спеціальностей./ В.М. Франчук – К.: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2014. – 120 с.

References

1. Informatsiina bezpeka: navchalnyi posibnyk / [Iu. Ya. Bobalo, I. V. Horbatyi, M. D. Kiselychnyk, A. P. Bondariev ta in.]; za zah. red. d-ra tekhn. nauk, prof. Yu. Ya. Bobala ta d-ra tekhn. nauk, dots. I. V. Horbatoho. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2019. – 580 s.

2. Prykladna kryptolohiia: systemy shyfruvannia : pidruchnyk / O. H. Korchenko, V. P. Sidenko, Yu. O. Dreis. – K. : DUT, 2014. – 448 s.

3. Osnovы kryptohrafyy/ H.V. Basalova. – M.: YNTUYT, 2016. - 283 s.

4. Cryptology and information security - past,present, and future role in society/ S. Bhattacharya. - International Journal on Cryptography and Information Security (IJCIS). – Vol. 9, No.1/2, 2019. – P. 13-36.

5. Muliar I.V. Iteratsiino-heometrychnyi metod dlia stiikoho pertseptualnoho kheshuvannia zobrazhennia / V. M. Dzhulii, Yu. P. Klots, I. V. Muliar, V. M. Cheshun // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 1. – S. 76–79

6. Hybrid cryptographic technique using rsa algorithm and scheduling concepts/ M. Shankar, P. Akshaya// International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)/ Vol.6, No.6. – 2014. - p. 39-48

7. Kompiuterna stehanohrafichna obrobka y analiz multymediinykh danykh: pidruchnyk. / H. F. Konakhovych, D. O. Prohonov, O. Yu. Puzyrenko. – Kyiv: «Tsentr uchbovoi literatury», 2018. – 558 s.

8. Digital Watermarking and Steganography: Fundamentals and Techniques / Edited by Frank Y. Shih. – Taylor & Francis Group, 2017. – 293 p

9. The Evolution of Cryptology [Elektronnyi resurs]/ G. R. Souza. – California State University, San Bernardino, 2016. – rezhym dostupu: https://core.ac.uk/reader/55336770

10. Cryptology and communication security [Elektronnyi resurs]/ Shri Kant. – Defense Science Journal. – Vol. 62. - №1. – rezhym dostupu: https://core.ac.uk/reader/333719963

11. Kryptoanalyz shyfrsystemы ACBF/ Y. V. Borovkova, Y. A. Pankratova. – Prykladnaia dyskretnaia matematyka. Prylozhenye, Tomsk. – 2019. – S. 90-93.

12. Zakhyst informatsiinykh resursiv: kryptohrafichni ta stehanohrafichni metody zakhystu danykh. Posibnyk dlia vykladachiv, vchyteliv ta studentiv informatychnykh spetsialnostei./ V.M. Franchuk – K.: NPU imeni M.P. Drahomanova, 2014. – 120 s.

Надійшла / Paper received : 12.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-39-44
УДК004.9

О.М. ШИНКАРУК
Львівський Державний університет внутрішніх справ, м. Львів, Україна
О.М. ЯШИНА, О.Г. ОНИШКО
Хмельницького національного університету, м. Хмельницький, Україна

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРОГРАМНИХ ВЕБ-СИСТЕМ ЗАСОБАМИ РОЗРОБКИ

У даній статті наведено результати досліджень існуючих засобів і визначення теоретичних аспектів застосування сучасних фреймворків для розробки програмного забезпечення, а також обґрунтування доцільності та впливу варіативності вибору на якість розроблюваних програмних додатків. Основними результатами дослідження є обгрунтування вибору фреймворків для розробки програмного забезпечення. Потрібно відмітити, що не зважаючи на велику кількість фреймворків, структурований аналіз здійснений досить незначною кількістю дослідників, що і обумовлює наукову новизну даного питання. Практична значущість полягає у можливості застосування тих чи інших фрейморків відповідно до потреб замовника та розробника для досягнення певних результатів при розробці програмного забезпечення.

Ключові слова. Фрейморк, CSS, програмне забезпечення, програмний продукт, мова програмування, управління якістю.

O. M. SHYNKARUK
Lviv State University of Internal Affairs
O. M. YASHYNA, O. H. ONYSHKO,
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

SOFTWARE QUALITY MANAGEMENT DEVELOPMENT TOOLS

At the present stage of development of software tools in the field of web development, the number of web frameworks (VFK) has increased sharply. All of them have a number of advantages and disadvantages, and therefore it is important to choose the right and appropriate framework or set for each project, because the right choice depends on the quality, implementation time and reliability of each software product being developed.

Generally speaking, web frameworks have definitely changed and improved their programming capabilities and become an integral part of the development process. There is a large amount of information related to VFK, but often this information contains only definitions and complex terms that do not give any idea about these tools. That is why the question of justifying the variable choice of frameworks and their impact on software quality is an urgent task at the present stage of programming development.

This article presents the results of research on existing tools and the definition of theoretical aspects of the use of modern frameworks for software development, as well as justification of the feasibility and impact of choice variability on the software applications quality. The main results of the study are the rationale for the frameworks' choice for software development. It should be noted that despite the large number of frameworks, the structured analysis was carried out by a rather small number of researchers, which determines the scientific novelty of this issue. The practical significance lies in the possibility of using certain frameworks in accordance with the needs of the customer and the developer to achieve certain results in software development.

Keywords. Framework, CSS, software, software product, programming language.

Постановка проблеми.

На сучасному етапі розвитку засобів програмування в галузі веб-розробки кількість веб-фреймворків (ВФК) різко зросла. Всі вони володіють певною низкою переваг та недоліків, а тому актуальним є питання вибору правильного та відповідного фреймворку або їх набору для кожного конкретного проекту, адже від правильного вибору залежить якість, час реалізації та надійність кожного розроблюваного програмного продукту.

Взагалі кажучи, веб-фреймворки однозначно змінили та покращили своєю появою можливості програмування і стали невід'ємною частиною процесу розробки. Існує велика кількість інформації, що стосується ВФК, але часто ця інформація містить тільки визначення та складні терміни, які не дають ніякого уявлення про дані засоби. Саме тому питання обґрунтування варіативного вибору фреймворків та їх вплив на якість програмного забезпечення є актуальним завданням на сучасному етапі розвитку програмування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Методологічною основою даного дослідження є праці таких дослідників як Jacek Schae, Маєрт О.Д., Масляк Т.А., Колесникова Т.А. та багато інших. Деякими загальними аспектами використання фреймворків займались Татур Ю.Л., Білоконна К.В. Використання *CSS*-фреймворків у своїх роботах описують Масляк Т.А., Колесникова Т.А.Загалом. Разом із тим, в теперішній час, виконується велика кількість різноманітних досліджень, присвячених застосуванню тих чи інших ВФК та їх доцільності щодо розробки певного програмного продукту. Однак, потрібно відмітити, що проблема варіативності вибору веб-фреймворків при створенні програмних продуктів займає незначне місце у вітчизняних та зарубіжних роботах.

Не зважаючи на те, що дослідження в галузі застосування фреймворків постійно проводяться, наукових робіт, присвячених варіативності вибору та доцільності їх використання в тій чи іншій сфері розробки та впровадження програмного забезпечення недостатньо, що і обумовило виявлення до даного завдання підвищеного наукового та практичного інтересу.

Мета дослідження. Визначення теоретичних аспектів застосування сучасних фреймворків для розробки програмного забезпечення, а також обґрунтування доцільності та впливу варіативності вибору на якість розроблюваних програмних додатків.

Виклад матеріалу дослідження.

З урахуванням того, що веб-фреймворк є інструментом полегшення написання і запуску веб-додатків, розробнику не потрібно самостійно прописувати велику кількість коду та витрачати час на пошук потенційних прорахунків і помилок [1,2,3]. В сучасних умовах існує можливість виброру з наявних мов для веб-програмування відповідного фреймворку, як для статичних, так і для динамічних сторінок. Так, в залежності від поставленого завдання, необхідним є вибір одного ВФК, що здатний задовільнити всі потреби, або поєднання декількох.

Слід приймати до уваги, що у ВФК є дві основні функції: робота на серверній стороні (бекенд) і робота на клієнтській стороні (фронтенд). При цьому, фронтенд-фреймворки пов'язані із зовнішньою частиною програми, тобто відповідають за інтерфейс, а бекенд-фреймворки відповідають за внутрішню чатину додатку, тобто логікудодатку.

Як показує практика, серверні веб-фреймворки (СВФК) не дають можливості створення веб-додатків з насиченим інтерфейсом. Вони обмежені в своїй функціональності, однак забезпечують створення простих сторінок і різних форм. Також, СВФК здатні забезпечити формуваня вихідних даних і відповідати за безпеку в разі атак. Все це, безумовно, може спростити процес розробки. Серверні фреймворки, в основному, відповідають за окремі, але критично важливі частини програми, без яких неможливе стале функціонування. Найбільш поширеними фреймворками такого типу і мови програмування, з якими вони працюють, слід виділити наступні:

- Django – Python;
- Zend – PHP;
- Express.js – JavaScript;
- Ruby on Rails – Ruby.

На відміну від серверних, клієнтські веб-фреймворки (КВФК) ніяк не пов'язані з логікою програми. Цей тип фреймворків працює в браузері. З їх допомогою можна поліпшити і впровадити нові користувальницькі інтерфейси. Фронтенд-фреймворки дозволяють створювати різні анімації і односторінкові додатки. Всі клієнтські фреймворки відрізняються по функціональності і використанню. Найбільш поширеними фреймворками такого типу слід виділити наступні:

- Backbone+Marionette;
- Angular;
- Ember.js;
- Vue.js.

Всі ці фреймворки використовують мову програмування - *JavaScript*.

Разом з типами фреймворків, що приведені вище, набули широкого використання для вирішення окремих завдань програмування й багатофункціональні фреймворки. *Meteor* відомий як фул-стек веб-фреймворк. Це означає, що він здатний задовільнити майже всі потреби як з боку клієнта, так і з боку сервера, що робить *Meteor* надзвичайно популярним. Його використання забезпечує заощадження часу, наприклад, на налагодження взаємодії між двома ВФК через *RESTAPI*. Використання, при цьому, ВФК *Meteor* забезпечить виконання відповідних процедур і прискорить процес розробки. Оскільки обидві сторони — серверна та клієнтська — працюють на одній мові, то існує можливість створення і використання для них одного коду. Одна з особливостей даного ВФК — «режим реального часу» — внесення змін в одному інтерфейсі, обумовлює зміни і в інших. Наприклад, при додаванні коментарів або зміні змісту документу або таблиці із загальним доступом, інші користувачі це також будуть бачити.

Окрему увагу слід приділити й розмірам (масштабам) фреймворків. Розрізняють ВФК, що здатні забезпечити рішення для всіх завдань, і більш легкі варіанти, які спеціалізуються на вирішенні конкретних завдань — такі фреймворки називаються мікрофреймворками. Останні не здатні забезпечити вирішення всіх завдань, проте іноді краще розкласти функціональність на кілька підходів (фреймворки, мікрофреймворки, бібліотеки). При цьому, слід зауважити, що розширення функціональності мікрофреймворків можливе за допомогою сторонніх додатків і створенням невеликих проектів на їх основі, або шляхом поєднання мікрофреймворку з основним «великим» фреймворком.

Наприклад, якщо додаток заснований на ВФК *Django* і потрібні веб-сокети, то є доцільним використання мікрофреймворку *aiohttp*. Або, якщо додаток не дуже великий і потрібна лише проста маршрутизація *URL* і шаблони з нескладним контекстом, то можливе використання ВФК *Flask* замість *Django*.

Незважаючи на те, що існуючі ВФК відрізняються один від одного, їх вибір може бути складним завданям, тому, слід навести кілька ознак, які є загальними для них усіх. Це архітектура і особливості, які важливі так, як і функції.

Архітектура всіх ВФК заснована на декомпозиції декількох окремих прошарків (додатки, модулі і інш.), що означає, можливість розширення функціональності в залежності від потреб і використання зміненої версії разом з кодом ВФК або використання сторонніх додатків. Така гнучкість вважається ще однією ключовою перевагою фреймворків. Існує безліч додатків з відкритим вихідним кодом (*open source*),

спільнот і комерційних організацій, які створюють програми або їх розширюють для популярних фреймворків, наприклад, *Django REST Framework*, *ng-bootstrap* і інш.

Таким чином, зміст кожного веб-фреймворка формується трома складовими: модель, представлення, контролер (model, view,controller), скорочено MVC, що подано на рис. 1.

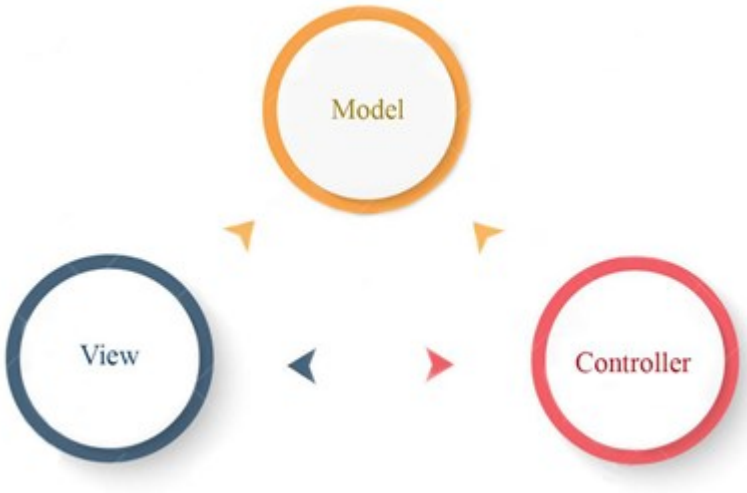


Рис. 1. Зміст веб-фреймворка.

Модель містить всі дані і рівні бізнес-логіки, її правила і функції.

Представлення відповідає за візуальне відображення даних, наприклад, діаграми, графіки і т. д.

Контролер просто трансформує дані для команд попередніх двох складових.

Вони невіддільні один від одного, тому важливо як слід у всьому розібратися, щоб уникнути помилок під час роботи програми.

Важливого значення набувають особливості фреймворків, основні з них подані на рис.2, які роблять їх багатофункціональними і зручними на практиці.

Рис. 2. Особливості веб-фреймворків.

Веб-кешування забезпечує збереження різних документів і дозволяє уникнути перевантаження сервера. Тому наявна можливість його використання в різних системах за певних умов. Також веб-кешування працює на серверній стороні. Наприклад, існують кешовані веб-сторінки на сторінці пошукової видачі *Google*.

Скафолдинг – це ще одна технологія, що полягає в автоматичному генеруванні типових частин програми або струкутри проекту. Це дозволяє істотно збільшити швидкість розробки і стандартизує кодову базу.

Система веб-шаблонів являє собою набір різних методологій і програмного забезпечення, реалізованих для створення і розгортання веб-сторінок. Для обробки веб-шаблонів використовуються шаблонізатори, що вважаються інструментом фреймворку, який відповідає за веб-публікацію.

Зіставлення *URL* – це функція фреймворків, що сприяє спрощенню доступу до сторінок веб – сайту, індексаціїйого пошуковими рушиями, створюючи привабливу назву.

Велика кількість типів веб-додатків підтримуються веб-фреймворками, що застосовуються, в основному, для створення таких додатків, як блоги, форуми, *CMS* і інш.

Наведена інформація щодо функціональності властива всім ВФК. Разом із тим, широкий асортимент фреймворків, як правило, ускладнює їх вибір.Тому, для полегшення розробки варто використовувати критерії, що обумовлюють кращий інструмент. Наприклад, ВФК *Angular*на мові програмування *JavaScript*– це фреймворк від *Google*, розроблений спеціально для створення динамічних веб-додатків, в точу числі інтерфейсних додатків без необхідності застосовування інших плагінів або фреймворків. Його структура утримуєнизку цікавих функцій. Зокрема, використовуючи шаблони, відкривається можливість відображення інформації з моделі і контролера. При цьому, ВФК *Angular* підтримує архітектуру *MVC*, що відкриває можливість розділення додатку на *MVC* компоненти. При цьому, все інше управляється засобами фреймворка.

Всі ці функції є частиною платформи, яка сприяє розробці ефективного веб-сайту. Ось лише деякі приклади майданчиків, розроблених за допомогою цього фреймворка: *Netflix*, *Freelancer.com*, *GoodFIlms* і інш.

Фреймворк *RubyonRails* створений мовою програмування *Ruby*. Однією з його переваг вважається докорінне спрощення і прискорення розробки веб-додатків за рахунок повторного використання коду. Такий підхід дозволяє додавати деякі додаткові функції. Серед популярних веб-сайтів, написаних на *Ruby on Rails*, можна виділити *Basecamp*, *Ask.fm*, *GitHub*, *500px*і інш. Але, основною перевагою цього фреймворку слід вважати швидку розробку з меншою кількістю написаного коду та помилок. До інших його переваг доцільно віднести гнучкість, що полягає в можливості широкого кола застосування (наприклад, від управління проектами до будівництва), швидкість, що полягає в здатності скорочення часу розробки веб-додатків приблизно на *30-40%*,і можливість вносення змін в код. Саме тому фреймворк *RoR* ідеально підходить для довготривалих проектів.

Фреймворк *YII* є платформою з відкритим вихідним кодом, що вбудована в *PHP5*. Завдяки зрозумілому дизайну і зручному інтерфейсу, цей фреймворк забезпечує надзвичайно просту і швидку веб-розробку. Він оптимізований по продуктивності, що дозволяє його використання для будь-яких проектів. Крім того, дана платформа утримує інструменти, які володіють здатністю налагодження і тестування додатку. Цікавою особливістю платформи слід вважати можливість увімкнення класів та об'єктів, лише, за потреби, що прискорює завантаження додатків. Дані функції сприяють створенню високопродуктивної структури, що сприяє розробці ефективних веб-сайтів (наприклад, *TACC*, *Craftcms*, *Hum Hub* і інш.).

Фреймворк *Meteor JS* розроблений на платформі *Node.js* дозволяє створювати різні *real-time* веб-додатки. Одна з основних особливостей *Meteor JS* — належна основа для створення простих сайтів особистого користування.

Meteor JS це ізоморфний *JavaScript* веб-фреймворк з відкритим вихідним кодом, що сприяє швидкому завантаженню сторінок. Крім того, завдяки інтегрованому стеку *JavaScript*, який простягається від бази даних кінцевого користувача до екрану, існує можливість виконання в *10* рядках коду те, що, зазвичай, розтягується на *1000* рядків.

Одна з особливостей даного фреймворку полягає в можливості використання одного коду при розробці під операційні системи *iOS*, *web*, *Android* або *desktop*. Також існує можливість використання різних популярних фреймворків та інструментів для створення функцій.

Фреймворк *Express.js* на платформі *Node.js* покриває цілий ряд важливих функцій плагінами, тому доцільним вважається використання для швидкої розробки веб-додатоку і прикладного програ́много інтерфе́йсу(*API*). Також даний фреймворк придатний до використання для створення мобільних додатків.

По суті, *Express.js* складається з *Angular* і бази даних *MongoDB*. Це означає, що для розробки веб-сайтів достатньо знання таких мов, як: *HTML*, *CSS* і *JavaScript*. А використовуючи модулі *npm*, відкривається можливість розширення функціоналу додатків. Також *Express.js* ідеальний для створення простих веб-сервісів.

Zend — це *opensource* фреймворк, що розроблений на мові *PHP*. Він орієнтований на розробку сучасних, надійних і безпечних веб-сервісів. При цьому застосовуються різні професійні пакети *PHP*, які роблять розробку веб-сайтів найвищого класу значно простіше і швидше. Крім того, ВФК використовує архітектуру *MVC*, що відокремлює базу даних і бізнес-логіку від представницького рівня. Це сприяє отриманню більш зрозумілого і чистого коду. Веб-фреймворк *Zend* базуєтьсяна концепціях об'єктно-орієнтованого програмування, що відкриває можливість розширення різних компонент фреймворку. Також слід відзначити маршрутизацію, яка виконує свою роботу бездоганно, і функції кеша.

Django- найпопулярніший фреймворк для веб-розробки, написаний на мові програмування *Python* і використовує архітектуру *MVC*. Ключовими особливостями цієї платформи слід вважати наступні.

Швидкість. Головна мета фреймворка-допомогти розробникам зробити додаток, як можна швидше. Причому, на всіх етапах розробки — від ідеї до релізу. Ефективність і економічність – саме так можна сформулювати девіз *Django*.

Безпека. Як правило, деякі безпекові помилки, що пов'язані з «ін'єкціями» мови програмування структурованих запитів *SQL*, а також підробкою міжсайтових запитів і міжсайтовим скриптингом. *Django*

ефективно управляє наявними іменами користувача і паролями, а система аутентифікації користувача, як відомо, відіграє вирішальну роль.

Масштабованість. Більшість бізнес-сайтів використовують ВФК *Django* для швидкого задоволення потреб трафіку.

Багатофункціональність. Фреймворк включає в себе додаткові опції для допомоги з картами сайту, аутентифікацією користувачів, адмініструванням контенту, *RSS*-канали і багато іншого. Кожна з них надає істотну допомогу в процес веб-розробки.

ВФК *Laravel* вважається одним з кращих *PHP* фреймворків. Він здатний забезпечити легку розробку, як веб, так і мобільних додатків для невеликих сайтів і великого бізнесу. При цьому, ВФК *Laravel* відрізняється наявністю багатьох цікавих функцій, таких як, наприклад, техніка авторизації, об'єктно-орієнтовані бібліотеки, підтримка *MVC*, міграції баз даних, міжсайтові запити і інш.

До основних переваг цього фреймворку можна віднести:

- Можливість збільшення трафіку сайту, що обумовлює застосування до будь-якого браузера та пристрою.
- Гнучкість. Фреймворк має модульну структуру, що допомагає спростити сам веб-сайт і процес його розробки.
- *PHP* не потребує спеціальних способів обслуговування, що пов'язано з автоматичним завантаженням об'єкта, який міститься в програмному забезпеченні.
- Фреймворк *Laravel* може створювати унікальні *URL*-адреси, так як реалізує різні маршрути з однією і тією ж назвою.

Як показує досвід, кожен фреймворк володіє низкою переваг і недоліків, що проявляються при вирішенні певних задач. При виборі фреймворку необхідно враховувати декілька чинників, а саме:

1) можливості фреймворку повинні чітко відповідати завданням проекту. Зайвий функціонал не потрібен, але при цьому ніколи не повинно виникати обмежень при доопрацюванні проекту;

2) фреймворк повинен сприяти зменшенню часурозробки сайту;

3) для зручності використання фреймворку іншим розробником він повинен бути поширеним;

4) безпека фреймворка-один з найважливіших його показників.

У випадках прийняття рішення щодо вибору фреймворку, зазвичай порівнюється, з одного боку, заощаджений час за рахунок рішень, пропонованих фреймворком, а з другого боку, час, що витрачений на вивчення нової платформи. За таких умов вибір доцільно спрямовувати на технологію, що дозволяє в мінімальні терміни вирішити потрібне завдання. Разом із тим слід відмітити, що вибір до застосування нової технології може стати дерелом таких ризиків, як: внутрішні помилки, слабка підтримка і документація від розробника, неопрацьованість рішень під конкретні задачі.

Взагалі, при виборі найбільш ефективного ВФК доцільно проаналізувати завдання, чітко його формалізувати, вибрати «топ-5» відповідних варіантів, написати на них невеликий додаток і обрати найкращий.

Також, існує потреба оцінювання ступеню відповідності функціоналу, з переліку претендентів, вимогам проекту, а також тривалість застосування готового функціоналу. При цьому,обов'язково потрібно звернути увагу на можливість зворотньої сумісності, якщо фреймворк змінюється до версії *API*. За відсутності даної можливості такий ВФК використовувати не доцільно.

Як на думку авторів, обрання з відомого набору ВФК вважається нескладним завданням тому, що при проектуванні відразу видно потребу в тих чи інших технологіях. Далі постає завдання збільшення відомих фреймворків, тому, в даному випадку, варто, в першу чергу, вивчити фреймворки, які охоплюють різні технології і найбільш відрізняються один від одного. Наприклад, будь-який класичний *MVC*-фреймворк та ВФК іншої інфраструктури.

Також, слід відмітити, що вибір ВФК, як будь-якого інструменту, залежить від термінів проекту. Якщо проект короткотривалий, тослід обирати, наприклад, з групи *Bootstrap*, або щось нове і паралельно його вивчати. Якщо проект довготривалий, то краще формувати окрему бібліотеку структур.

Сучасні ВФК містять велику кількість готового функціоналу і помітно прискорюють розробку проектів. Тому, сьогодні більш актуальним вважається завдання вибору фреймворків, а не мов програмування. Зазвичай, вбудований готовий функціонал дозволяє зібрати досить ефективну бібліотеку структур. Важливою перевагою готового функціоналу, безперечно, залишається уникнення рутинного програмування. Разом із тим, одним з основних ризиків застосування різних ВФК і їх адаптації до конкретних задач, є «людський чинник». Як тільки завдання виходять за межі певного фреймворка або виникає необхідність у використанні іншого, часто виникає потреба залучення інших фахівців.Якщо сегментація технічних рішень поглиблюватиметься, то так і буде. Але в даний момент більшість фреймворків підтримують схожий функціонал, і сегментація не надто висока. Специфічні рішення є тільки для наймасовіших видів завдань.

Також, слід зауважити, що мови і фреймворки, особливо на пізніх стадіях розвитку, це ортогональні речі. У розвинених екосистемах фреймворки, як правило, мають *API* для роботи з декількома мовами і навпаки: мови з великою екосистемою мають низку фреймворків, готових для використання.В сучасних умовах, при старті проекту, вибір фреймворку, зазвичай, стоїть на першому місці, ще до вибору мови. Якщо ж, наприклад, дістався *legacy*-проект, то, як правило, вибір мови відсутній. Мікросервиси, один з головних

архітектурних трендів сьогоднішнього дня, намагається вирішити в тому числі і цю проблему — «звільнити» розробників від використання конкретної мови або фреймворку, щоб кожна частина проекту розроблялася на найбільш адекватних для неї технологіях.

Слід виділити важливі чинники, що дають гарантію надійності і стабільності фреймворку. Гарантія надійності фреймворка – його відмовостійкість. Правильна розробка, оптимізація запитів, ефективне кешування – ось запорука успіху. Наявність стабільних релізів, велика кількість користувачів, наявність автоматизованих тестів, наявність активності, *opensource* (відкритий код).

Приймаючи до уваги активність застосування ВФК слід систематизувати проведені дослідження напрямів їх розвитку. Так, проведений аналіз свідчить про те, що фреймворки будуть рухатися по шляху «полегшення» розробки. Типові рішення, готові модулі та інше – все для того, щоб непідготовлена людина змогла розгорнути сайт.

Для багатьох популярних платформ період нарощування функціональності пройшов. На даний момент розвиток сфокусовано на збільшенні швидкодії. Це справедливо і для *frontend*-, і для *backend*-фреймворків. В якості часткового рішення розглядається поділ фреймворка на логічні модулі. Для проекту повинен збиратися комплект бібліотек, що вирішують тільки необхідні завдання. А одним з рішень слід вважати щільніше з'єднання клієнтської та серверної частин фреймворків з єдиним синтаксисом та логікою роботи із контентом. Принцип «спрощення», який описано вище, призводить до того, що фреймворки стають складнішими за змістом, але все простішими для користувача.

Розвиток фреймворків залежить від потреб ринку та можливостей браузерів і призначених для користувача девайсів. Подальше удосконалення фреймворків, безпосередньо, залежить від розвитку і появи нових платформ, як, наприклад, розробка технології *Canvas*, *WebGL Node.js*–обумовила появу ВФК по роботі з ними.

Висновки. Отже, проаналізувавши ряд наукових робіт, що стосуються використання фреймворків для розробки програмного забезпечення наочним є висновок, що незважаючи на велику популярність даних засобів, існують й протиріччя у їх використанні.

Вибір відповідного фреймворка є однією з основних засад, що визначає якість майбутнього сайту. Кожну з технологій, що наведені у даній статті можна вважати вичерпною у всіх відношеннях тому, що їх використовують, як у практиці перетворення в графічний інтерфейс (*frontend)*, так і для розробки варіанту архітектури програмного забезпечення (*backend*). Тому, слід обирати платформу у відповідності до зручностей щодо мов програмування.

Отже, *Agile* найбільше підходить для проектів із «відкритим кінцем», наприклад, запуск інтернет-сервісів, розробка комп'ютерних ігор, операційних систем. Однак, гнучкість може приводити до втрати фокусу та втрати передбачуваності. Дуже важливо відокремлювати помилки застосування гнучкого підходу від недоліків самої методології. Перш, ніж будуть реалізовані всі переваги підходу, потрібно буде деякий час на адаптацію до реалій конкретних завдань.

Література

1. Интернет-аудитория Украины. Статистика 2012-2013 и прогноз на 2014 год [Электронный ресурс] / Netpeak. Режим доступак ресурсу: www/ URL: http://blog.netpeak.ua/internet-auditoriya-ukrainy-statistika-2012-2013- i-prognoz-na-2014- god.
2. Мейерт Д.О. Небольшая книга о HTML /CSS фреймворках[Текст] / Д.О. Мейерт// Орейли. – 2015. – 30 с.
3. Агалаков С.А. Статистические методы анализа данных [Текст] / С.А. Агалков. – 18 с.
4. Білоконна К.В. Новітні технології розробки Web-додатків / Інноваційні та інформаційні технології в бізнесі та освіті [Електронний ресурс] : матеріали міжвузівського студентського вебінару (Вінниця, 21 жовт. 2015 р.) / відп. ред. Л.Б. Ліщинська. – Вінниця : ВТЕІ КНТЕУ, 2015. – С. 9-10. – Режим доступу: http://www.vtei.com.ua/doc/materialu_vebinary.pdf
5. WRITING ANGULAR 2 IN TYPESCRIPT [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://victorsavkin.com/post/123555572351/writing-angular-2-in-typescript — Назва з екрана.
6. One framework. Mobile and desktop [Електронний ресурс]— Режим доступу: https://angular.io/ – Назва з екрана.

References

1. Internet-auditorija Ukrainy. Statistika 2012-2013 i prognoz na 2014 god [Jelektronnyj resurs] / Netpeak. Rezhim dostupak resursu: www/ URL: http://blog.netpeak.ua/internet-auditoriya-ukrainy-statistika-2012-2013- i-prognoz-na-2014- god.
2. MejertD.O. Nebol'shaja kniga o HTML /CSS frejmvorkah[Tekst] / D.O. Mejert// Orejli. – 2015. – 30 s.
3. Agalakov S.A. Statisticheskie metody analiza dannyh [Tekst] / S.A. Agalkov. – 18 s.
4. Bilokonna K.V. Novitni tehnologiї rozrobki Web-dodatkiv / Innovacijni ta informacijni tehnologiї v biznesi ta osviti [Elektronnij resurs] : materiali mizhvuzivs'kogo students'kogo vebinaru (Vinnicja, 21 zhovt. 2015 r.) / vidp. red. L.B. Lishhins'ka. – Vinnicja : VTEI KNTEU, 2015. – S. 9-10. – Rezhim dostupu: http://www.vtei.com.ua/doc/materialu_vebinary.pdf
5. WRITING ANGULAR 2 IN TYPESCRIPT [Elektronnij resurs] — Rezhim dostupu: http://victorsavkin.com/post/123555572351/writing-angular-2-in-typescript — Nazva z ekrana.
6. One framework. Mobile and desktop [Elektronnij resurs]— Rezhim dostupu: https://angular.io/ – Nazva z ekrana.

Надійшла / Paper received : 21.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-45-50
УДК 651.4.9 : 004

Ю.Л. ТИХОНОВ
Національний університет ім. Тараса Шевченка

МІЖНАРОДНІ ПОКАЗНИКИ РІВНЯ ОСВІТИ

У даній роботі на основі аналізу досліджень і публікацій відзначається, що міжнародні індикатори не повною мірою відображають національну специфіку і недостатньо адекватні для ряду країн. Необхідна розробка індикаторів, які відображають специфіку освіти з урахуванням порівняння ступеня розвитку по регіонах країни, впливу специфічного положення окремих її регіонів. Розроблено індекс регіонального розвитку, який дозволяє, по-перше, визначити ширший спектр властивостей ресурсів, по-друге, адаптувати наведену схему до практичних задач, по-третє, аналізувати слабкі місця розвитку регіону в порівнянні з іншими.

Ключові слова: базові індикатори, індекс, освіта, якісні оцінки ресурсів, агрегована оцінка, вагові коефіцієнти.

Y. TIKHONOV
Taras Shevchenko National University

INTERNATIONAL INDICATORS OF EDUCATION LEVEL

Education is one of the factors influencing the development of the country. To assess the degree of development of education requires the definition and comparison of the degree of development of education and socio - economic condition of the country, systematic analysis of a large number of multifaceted factors of interaction of economy, education, social sphere including all their components.

International organizations have been building such indicators for the world for many years. For example, the UN has been publishing the Human Capital Development Index annually since the 1990s. This index includes an assessment of the level of education. Organization of economic cooperation and development, etc. Integrated indices are introduced to analyze the development of education and the socio-economic system, which assess the degree of development of education in the world, and allow to identify weaknesses that need to be addressed in the first place.

In this paper, based on the analysis of research and publications, it is noted that international indicators do not fully reflect national specifics and are not adequate for a number of countries. It is necessary to develop indicators that reflect the specifics of education on the basis of comparing the degree of development in the regions of the country, the influence of the specific position of its individual regions. An index of regional development has been developed, which allows, firstly, to determine a wide range of properties of resources, secondly, to adapt the given scheme to practical tasks, and thirdly, to analyze the weaknesses of the development of the region in comparison with others.

Keywords: basic indicators, index, education, qualitative resource assessments, aggregated assessment, weights.

Вступ

Освіта є одним з факторів, що впливають на розвиток країни. Для оцінки ступеня розвитку освіти потрібно визначення і зіставлення ступеня розвитку освіти і соціо - економічного стану країни, системного аналізу великого числа багатопланових факторів взаємодії економіки, освіти, соціальної сфери включаючи всі їх компоненти.

Побудовою таких індикаторів для країн світу багато років займаються міжнародні організації. Наприклад, ООН, з 90-х років публікує Індекс розвитку людського капіталу щорічно. В цей індекс входить оцінка рівня освіти [1]. Організація економічного співробітництва та розвитку [2] та ін. Вводять інтегральні індекси для аналізу розвитку освіти та соціально-економічної системи, які оцінюють ступінь розвитку освіти по країнам світу, і дозволяють визначити слабкі місця, на які необхідно звернути увагу в першу чергу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даний час існує ряд систем індикаторів, які використовують інформацію про тих, хто навчається, про інвестиції в освіту, про навчання впродовж життя, про освітнє середовище [1, 2]. Оцінюється загальна кількість випускників, використовуються типові вікові коефіцієнти для розрахунку всіх випускників з міжнародної стандартної класифікації освіти (International Standard Classification of Education - ISCED) [3]. Соціальний, економічний та культурний статус вимірюється за допомогою індексу ESCS-Index of Economic, Social and Cultural Status [4]. Розраховується HISEI-Highest Occupational Status of Parents, PARED-Highest Parental Education, HOMEPOS-Home Possessions [5, 6]. Для визначення індексів використовуються досить складні обчислення [7, 8].

Міжнародні індикатори узагальнені, порівнюють показники по країнам світу, не повною мірою відображають національну специфіку і недостатньо адекватні для ряду країн. Необхідна розробка індикаторів, які відображають специфіку освіти з урахуванням порівняння ступеня розвитку по регіонах країни, впливу специфічного положення окремих її регіонів.

Мета і задачі дослідження

Розробити систему оцінок для визначення стану освіти, з метою аналізу поточної ситуації і майбутнього розвитку.

Результати дослідження

Розроблено принципово новий індекс регіонального розвитку, який дає підсумкову оцінку стану регіональних ресурсів.

Категорії ресурсів позначимо через l, види ресурсів k, їх порівняльний обсяг по регіонах n обсяг

через $r_{n,l,k}$, при цьому [8]:

$$\sum_{n} r_{n,l,k} = 1,\ 0 \le r_{n,l,k} \le 1 .$$

Дивись наприклад табл 1.

Таблиця 1

Соціальні ресурси.

Базові індикатори	Позначення
Матеріальне забезпечення	
Чисельність працюючих чоловіків	$r_{2,3,1}$
Чисельність працюючих жінок	$r_{2,3,2}$
Чисельність громадян, зайнятих некваліфікованою працею або працею, що не відповідає їх кваліфікації	$r_{2,3,3}$
Чисельність зареєстрованих безробітних чоловіків	$r_{2,3,4}$
Чисельність зареєстрованих безробітних жінок	$r_{2,3,5}$
Чисельність безробітних серед отримавших вищу освіту	$r_{2,3,6}$
Чисельність населення, що живе за межею бідності	$r_{2,3,7}$
Кількість захворювань, нещасних випадків, пов'язаних з виробництвом	$r_{2,3,8}$
Кількість захворювань через забруднення довкілля	$r_{2,3,9}$
……	

Визначимо базові індикатори рівня розвитку освіти [8]. (Табл. 2.).

Таблиця 2

Освіта (соціальні ресурси).

Базові індикатори	Позначення
Освіта	
Кількість дітей у дошкільних закладах	$r_{2,5,1}$
Кількість осіб шкільного віку	$r_{2,5,2}$
Кількість осіб, які навчаються в школі	$r_{2,5,3}$
Кількість осіб, які закінчили школу	$r_{2,5,4}$
Кількість дорослих з середньою освітою	$r_{2,5,5}$
Кількість вихователів дошкільних закладів	$r_{2,5,6}$
Кількість вчителів шкіл	$r_{2,5,7}$
Кількість вищих навчальних закладів III-IV рівня акредитації	$r_{2,5,8}$
Кількість університетів з глобальним ранжуванням	$r_{2,5,9}$

Поміжні оцінки утворюються н їх основі:
- відношення кількості працюючих та безробітних чоловіків і жінок

$$a_{2,3,1}=((r_{2,3,1}-r_{2,3,4})/r_{2,1,8}+(r_{2,3,2}-r_{2,3,5})/r_{2,1,9})/2;$$

використання кваліфікованої робочої сили: $a_{2,3,3}=1- r_{2,3,3}/(r_{2,3,1}+r_{2,3,2})$;
кількість безробітних з вищою освітою: $a_{2,3,4}=1-r_{2,3,6}/(r_{2,3,4}+r_{2,3,5})$;
Сукупна оцінка матеріального забезпечення має вигляд:

$$A_{2,3,1}=a_{2,3,1}*(a_{2,3,2}+\ldots+a_{2,3,7})/6,\ A_{2,3,2}=(a_{2,3,8}+a_{2,3,9})/2.$$

Вводяться якісні оцінки ресурсів $q_{2,3,p}(A_{2,3})$ та агрегована оцінка

$$Aq_{2,3}=A_{2,3}*q(A_{2,3}),$$
$$q(A_{2,3}) = \frac{1}{112}\sum_{p=1}^{28} q_{2,3,p}(A_{2,3}) .$$

Проміжні величини [8]

$$a_{2,5,1}=(r_{2,5,1}+r_{2,5,2})/r_{2,1,1},\ a_{2,5,2}=r_{2,5,3}/r_{2,5,2},\ a_{2,5,3}=r_{2,5,4}/r_{2,5,3},$$
$$a_{2,5,4}=(r_{2,5,4}+r_{2,5,5})/(r_{2,1,2}+r_{2,1,3}),\ a_{2,5,5}=(r_{2,5,6}+r_{2,5,7})/2,$$

де $r_{2,1,1}$ та $r_{2,1,2}+r_{2,1,3}$ - чисельність населення молодшого та старшого 17 років.
Агрегована оцінка рівня дошкільної та середньої освіти

$$A_{2,5,1}=(a_{2,5,1}+a_{2,5,2}+a_{2,5,3}+a_{2,5,4}+a_{2,5,5})/5.$$

Оцінка по вищих навчальних закладах:
- усереднена кількість ВНЗ з урахуванням їх рейтингів

$$a_{2,5,6}=(r_{2,5,8}+r_{2,5,9})/2;$$

- усереднена кількість викладачів та студентів ВНЗ –

$$a_{2,5,7}=(r_{2,5,10}+r_{2,5,11}+r_{2,5,12})/3.$$

Науково-педагогічну діяльність будемо оцінювати за допомогою кількості публікацій в Scopus- та у фахових виданнях

$$a_{2,5,8}=(r_{2,5,13}+r_{2,5,14})/2.$$

Якісні оцінки [8]:
- $q_{2,5,1}(A_{2,5})$ – доступність;
- $q_{2,5,2}(A_{2,5})$ – $q_{2,5,8}(A_{2,5})$, – тиск інших категорій ресурсів:
- $q_{2,5,9}(A_{2,5})$ – тиск зі сторони інших країн;
- $q_{2,5,10}(A_{2,5})$ – якість закладів освіти, включаючи оцінку рівня вартості;
- $q_{2,5,11}(A_{2,5})$ – якість одержаної освіти;
- $q_{2,5,12}(A_{2,5})$ – витрати часу на освіту;

Агрегована оцінка

$$Aq_{2,5}=A_{2,5}*q_{2,5}(A_{2,5}),$$

$$q(A_{2,5})=\frac{1}{80}\sum_{p=1}^{20} q_{2,5,p}(A_{2,5}) \quad (1)$$

Через агреговані оцінки аналізуються чинники розвитку освіти, які не відображаються як наявні ресурси.

Для більш точної моделі необхідно враховувати взаємозалежності ресурсів. У табл. 1 залежно представлені по ключовим взаємопов'язаним ресурсів. Їх детальний аналіз буде розвитком роботи.

У багатьох міжнародних індексах відбивається взаємозалежність ресурсів. Наприклад, індекс чистих внутрішніх заощаджень GS включає субіндекси ***GS*** - чисті внутрішні заощадження, ***EDE*** - величина витрат на освіту, ***DPNR*** - величина виснаження природних ресурсів та ін. [9].

Взаємовплив ресурсів виражається, наприклад, в підготовці фахівців, їх відповідності поточним і перспективним технологіям. Наприклад, взаємозв'язок навчання і зайнятості студентів ЛНУ ім. Т.Г.Шевченка (табл.2).

Використовуємо регіональні оцінки $r_{n,l,k}(t)$ в момент часу t. На їх основі визначаємо оцінки, які враховують такі чинники:
- можливість сприйняття оцінок непідготовленими особами;
- універсальність розрахунку і використання індексів для в різних сферах діяльності;
- використання для розрахунків мінімального обсягу інформації;
- можливість використання для визначення стратегій розвитку регіональних соціо - економічних систем.

Величини

$$r_{l,k}^{\min}(t_j)=\min_n r_{n,l,k}(t_j),$$
$$r_{l,k}^{\max}(t_j)=\max_n r_{n,l,k}(t_j),$$

вказують по всіх регіонах країни n, $n=1,..,N$, мінімальне та максимальне значення оцінок $r_{n,l,k}(t_j)$ ресурсу категорії l виду k в момент часу $t_j\in[t_0,T]$.

Величина

$$pr_{n,l,k}(t_j)=\frac{r_{n,l,k}(t_j)-r_{l,k}^{\min}(t_j)}{r_{l,k}^{\max}(t_j)-r_{l,k}^{\min}(t_j)},$$

вказує по всіх регіонах країни n порівняльне значення ресурсу категорії l виду k в момент часу t_j.

Величина

$$rc_{n,l,k}(t_{j+1})=pr_{n,l,k}(t_{j+1})-pr_{n,l,k}(t_j),$$

вказуватиме нормовану порівняльну оцінку зміни ***n,l,k***-ресурсу в момент t_{j+1} (розкид значень по регіонах країни враховується. Зростання $rc_{n,l,k}(t_{j+1})$ вказує на збільшення певного ресурсу в регіоні., таке зростання вказує на збалансованість стану ресурсів.

Таблиця 1

Взаємні залежності базових індикаторів матеріального забезпечення та освіти

		Чисельність працюючих чоловіків	Чисель ність працюючих жінок	Чисельність громадян, зайнятих некваліфікованою працею або працею, що не відповідає їх кваліфікації	Чисельність зареєстрованих безробітних чоловіків	Чисельність зареєстрованих безробітних жінок	Чисельність безробітних серед тих хто отримав вищу освіту	Чисельність населення, що живе за межею бідності	Обсяг тіньової заробітної плати	Валові заощадження населення	Грошові іноземні перекази населенню	Рейтинг впливу індикаторів освіти на індикатори матеріального забезпечення
		$r_{2,3,1}$	$r_{2,3,2}$	$r_{2,3,3}$	$r_{2,3,4}$	$r_{2,3,5}$	$r_{2,3,6}$	$r_{2,3,7}$	$r_{2,3,13}$	$r_{2,3,15}$	$r_{2,3,16}$	**R1**
Кількість дітей у дошкільних закладах	$r_{2,5,1}$		1		1	1	1	1				5
Кількість осіб шкільного віку	$r_{2,5,2}$		1									1
Кількість осіб, які навчаються в школі	$r_{2,5,3}$		1		1	1	1	1				5
Кількість осіб, які закінчили школу	$r_{2,5,4}$			1	1	1				1		4
Кількість дорослих з середньою освітою	$r_{2,5,5}$	1	1		1	1						4
Кількість вищих навчальних закладів III-IV рівня акредитації	$r_{2,5,8}$	1	1									2
Кількість університетів з глобальним ранжуванням	$r_{2,5,9}$	1	1									2
Кількість студентів у вищих навчальних закладах	$r_{2,5,11}$	1	1							1		3
Кількість іноземних студентів	$r_{2,5,12}$										1	1
Безкоштовних ЕК	$r_{2,5,15}$	1	1	1	1	1	1		1			7
Платних ЕК	$r_{2,5,16}$	1	1	1	1	1	1		1			7
……	…….	……										

У таблиці «1» вказує на наявність залежності.

Розглядаємо, як і вище, якісні оцінки ресурсів $q_{n,l,k}(t)$, які відображають характеристики ресурсів Введемо вагові коефіцієнти $u_{n,l,k}$ для регіонів

Величина

$$rnq_{n,l,k} = pr_{n,l,k}(t) * u_{n,l,k}(t) * q_{n,l,k}(t),\ q_{n,l,k}(t)$$

оцінює n, l, k-ресурс з урахуванням вагових коефіцієнтів і якісних оцінок.

Величина

$$rpk_{n,l}(t) = \sum_{j=1}^{K(l)} rnq_{n,l,j}(t),$$

оцінює ресурс виду ***k.***

Введемо додаткові вагові коефіцієнти для категорії ***l*** регіону ***n*** $w_{n,l}$ їх важливості, як і випадку коефіцієнтів видів ресурсів $u_{n,l,k}$.

Величина

$$RDI_n(t) = \sum_{l=1}^{L} rpk_{n,l}(t) * w_{n,l}, \quad \sum_{l=1}^{L} w_{n,l} = 1, \ 0 \le w_{n,l} \le 1,$$

утворює підсумкову оцінку регіональних ресурсів. Використовуємо RDI_n в ролі індексу регіонального розвитку.

Таблиця 2

Кількість студентів, що працюють по групах ЛНУ ім. Тараса Шевченка.

рік	Група	Приватне підприємство	робота в IT	робота в торгівлі	робота у сфері обслуговування	інші роботи	Всього
2015	комп'ютерна інженерія магістр 1 рік навчання	1	2	1	1	1	6
	інформатика, 3 курс		1		2	2	5
	інформатика магістр 2 рік навчання		2		2	1	5
	інформатика магістр 1 рік навчання		2		1		3
2016	комп'ютерна інженерія магістр 1 рік навчання		3	1			4
	документознавство та інформаційна діяльність, 2 курс	1	1		1		3
	комп'ютерна інженерія молодший спеціаліст, 3 курс		2		2		4
	програмна інженерія/інженерія програмного забезпечення, 3 курс		1	1	2		4
2017	програмна інженерія/інженерія програмного забезпечення, 2 курс		3	1			4
	комп'ютерна інженерія молодший спеціаліст, 3 курс		2		1		3
	комп'ютерна інженерія, 3 курс						0
	інформатика магістр 2 рік навчання		1		1		2
2018	комп'ютерна інженерія магістр 1 рік навчання	1	2				3
	комп'ютерна інженерія молодший спеціаліст, 3 курс		3	1			4
	програмна інженерія/інженерія програмного забезпечення, 3 курс		2				2
	інформатика, 3 курс, заочне відділення		1		1		2
2019	комп'ютерна інженерія, 3 курс					1	1
	комп'ютерна інженерія молодший спеціаліст, 3 курс	1	2	1			4
	інженерія програмного забезпечення, магістр 1 рік навчання				1	1	2
	комп'ютерні науки та інформаційні технології		1		2	1	4
	Всього по групах	4	31	6	17	7	65
	Середнє	0,06	0,48	0,09	0,26	0,11	1

Висновки

Розроблено індекс регіонального розвитку, який дозволяє, по-перше, визначити ширший спектр властивостей ресурсів, по-друге, адаптувати наведену схему до практичних задач, по-третє, аналізувати слабкі місця розвитку регіону в порівнянні з іншими.

Література

1. Human Development Indices and Indicators. [Електронний ресурс] // 2018. Statistical Update. – Режим доступу до ресурсу: http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018_human_development_statistical_update.pdf

2. OECD. Education at a Glance. [Електронний ресурс] // 2018: OECD Indicators. – Режим доступу до ресурсу: https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/eag-2018-en.pdf?expires=1551775704&id=id&accname=guest&checksum=8E62648D1E080B61281E8CA95D2FC7E3

3. Education, Measuring outcomes. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.oecd.org/education/

4. PISA-based Test for Schools Technical Report (Draft). [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/ PISA-based%20Test%20for%20Schools%20Technical%20Report%20-% 20OECD%202015%20-%20draft.pdf

5. Scaling Procedures and Construct Validation of Context Questionnaire Data. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/PISA%202012%20Technical%20Report_Chapter%2016.pdf

6. Adams, R. J. The Rasch rating model and the disordered threshold controversy /R. J. Adams, M. L. Wu, M. Wilson // Educational and Psychological Measurement, 72(4), pp. 547-573.

7. Adams, R. J. The Multidimensional Random Coefficients Multinomial Logit Model /R. J. Adams, M. Wilson, W.C. Wang // Applied Psychological Measurement, No. 21, pp. 1-23.

8. Горда С.Є. Методи ресурсного теоретико-ігрового аналізу процесів регіонального розвитку. – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, 2019. - 24 с.

9. Salisu M.A. Open, Flexible and Distributed e-Learning Environments [Електронний ресурс] International Journal of Computer (IJC), 2013.– Режим доступу до ресурсу: http://ijcjournal.org/index.php/InternationalJournalOfComputer/article/view/108

References

1. Human Development Indices and Indicators. [Електронний ресурс] // 2018. Statistical Update. – Режим доступу до ресурсу: http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018_human_development_statistical_update.pdf

2. OECD. Education at a Glance. [Електронний ресурс] // 2018: OECD Indicators. – Режим доступу до ресурсу: https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/eag-2018-en.pdf?expires=1551775704&id=id&accname=guest&checksum=8E62648D1E080B61281E8CA95D2FC7E3

3. Education, Measuring outcomes. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.oecd.org/education/

4. PISA-based Test for Schools Technical Report (Draft). [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/ PISA-based%20Test%20for%20Schools%20Technical%20Report%20-% 20OECD%202015%20-%20draft.pdf

5. Scaling Procedures and Construct Validation of Context Questionnaire Data. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/PISA%202012%20Technical%20Report_Chapter%2016.pdf

6. Adams, R. J. The Rasch rating model and the disordered threshold controversy /R. J. Adams, M. L. Wu, M. Wilson // Educational and Psychological Measurement, 72(4), pp. 547-573.

7. Adams, R. J. The Multidimensional Random Coefficients Multinomial Logit Model /R. J. Adams, M. Wilson, W.C. Wang // Applied Psychological Measurement, No. 21, pp. 1-23.

8. Gorda C.E. Metody resursnogo teoretiko-igrovogo analizu procesiv regionalnogo rozvitku. – Avtoreferat disertacii na zdobuttya naukovogo stupenya kandidata tehnichnyh nauk za specialnistyu 01.05.02 – «Matematichne modelyuvannya ta obchislyuvalni metody». – Institut telekomunikacij i globalnogo informacijnogo prostoru NAN Ukrainy, Kiiv, 2019. - 24 c.

9. Salisu M.A. Open, Flexible and Distributed e-Learning Environments [Електронний ресурс] International Journal of Computer (IJC), 2013.– Режим доступу до ресурсу: http://ijcjournal.org/index.php/InternationalJournalOfComputer/article/view/108

Надійшла / Paper received : 03.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

ЕКОЛОГІЯ

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-51-55
УДК 504:630*(477.44)

Є.Г. ДУДНИК
Вінницький національний аграрний університет

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ НА ДЕНДРОФОРУ М. ВІННИЦІ

Деревні насадження в урбоекосистемах виконують низку життєво важливих функцій, особливо в умовах погіршення екологічної ситуації у вигляді техногенного забруднення. Тому постає необхідність дослідження стану дерев, вивчення впливів забруднення на деревні насадження, оцінки їх середовище стабілізаційної ефективності, а також розробки програм по покращенню, захисту і збереженню дендрофлори у належному стані.

Проведено аналіз основних техногенних факторів впливу на зростання міських деревних насаджень. Окреслено найважливіші проблеми озеленення сучасного міста, узагальнено недоліки утримання та експлуатації зелених насаджень.

Зростання кількості населення, розширення міст, урбанізація та індустріалізація, збільшення автомобільного транспорту і концентрація його в містах призвели до значного забруднення міського середовища продуктами згорання бензину та інших видів органічного палива. В середньому на території України вихлопні гази автотранспортних засобів зумовлюють 40-45 % забруднення повітря.

Полютанти, корті потрапляють у повітря з вихлопними газами автомобілів, мають токсикологічну дію. Серед великої кількості складових небезпеку становить все більше зростання забруднення важкими металами, особливо сполуками свинцю.

Встановлені концентрації свинцю по двох видах дерев (Липа серцелиста, Каштан кінський) на різних вулицях з різним антропогенним навантаженням (вул. Пірогова, Хмельницьке шосе). Проаналізовано стан ялини звичайної у межах міста Вінниці. Проводилось дослідження в дев'яти місцях зростання насаджень ялини звичайної.

У статті виявленні закономірності адаптації деревних рослин до умов міського середовища за функціональними змінами в їхньому асиміляційному апараті при дії на них важких металів. За проаналізованими даними, у фітомасі дендрофлори, котра зростає поряд із проїжджою частиною міських вулиць за вегетаційний період в деяких випадках може накопичувалося в 20-40 разів більше сполук свинцю порівняно з фоновим вмістом.

Ключові слова: важкі метали, дендрофлора, зелені насадження, каштан кінський, липа дрібнолиста, урбоекосистема, ялина звичайна.

E.G. DUDNIK
Vinnytsia national agrarian university

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECHNOGENIC FACTORS ON THE DENROPHOR OF VINNITSA

Tree plantations in urban ecosystems perform a number of vital functions, especially in conditions of deteriorating environmental situation in the form of man-made pollution. Therefore, there is a need to study the condition of trees, study the effects of pollution on tree plantations, assess their environmental stabilization efficiency, as well as develop programs to improve, protect and preserve dendroflora in good condition.

The analysis of the main urbogenic factors influencing the growth of urban tree plantations is carried out. The most important problems of landscaping of the modern city are outlined, the shortcomings of maintenance and operation of green areas are generalized.

Population growth, urban expansion, urbanization and industrialization, the increase in road transport and its concentration in cities have led to significant pollution of the urban environment by the combustion of gasoline and other fossil fuels. On average, in Ukraine the exhaust gases of vehicles cause 40-45% of air pollution.

Pollutants that get into the air with car exhaust have a toxicological effect. Among the large number of components, the danger is an increasing increase in pollution by heavy metals, especially lead compounds

Concentrations of heavy metals on two types of trees (Linden heart, Horse chestnut) on different streets with different anthropogenic load (Pirogov Street, Khmelnitsky Highway) were established. The condition of spruce within the city of Vinnytsia was analyzed. The study was conducted in nine places of growth of spruce plantations.

The article reveals the regularities of adaptation of woody plants to the conditions of the urban environment by functional changes in their assimilation system under the action of heavy metals. According to the analyzed data, in the phytomass of dendroflora, which grows near the roadway of city streets during the growing season in some cases may have accumulated 20-40 times more lead compounds compared to the background content.

Key words: heavy metals, dendroflora, greenery, horse chestnut, small-leaved linden, urban ecosystem, spruce.

Постановка проблеми

Деревні насадження є потужним природним сегментом протидії негативним для навколишнього середовища наслідкам урбанізації і техногенного забруднення [1]. У той же час життєвий стан рослин в урботехногенних екосистемах часто сильно відрізняється від належного природного стану, що зменшує фітомеліоративну і декоративну роль деревних насаджень. Раціональний, своєчасний контроль та діагностика функціонального стану деревних рослин, оцінка середовище стабілізаційної ефективності насаджень, є актуальними науковими і практичними проблемами сьогодення, що відображені в основних напрямках державної екологічної політики.

Аналіз останніх джерел

Проведені на даний час дослідження стосовно впливу урбанізованого середовища на насадження стосуються переважно міст великих промислових регіонів, де деревні рослини зазнають суттєвих

ушкоджень від критичного забруднення довкілля. Водночас в урбоекосистемах з постійним помірним впливом полютантів помірних концентрацій спостереженя за реакціями рослин у глибоко трансформованому середовищі проводяться мало. Такі умови хоч і не спричинюють масових візуальних ушкоджень, але пришвидшують і скорочують життєвий цикл, зумовлюють передчасне ослаблення, старіння і втрати видового фіторізноманіття насаджень [2].

Розвиток міст, особливо великих, призводить до формування своєрідного урбанізованого довкілля з комплексом факторів, що негативно впливають на життєвість деревних рослин. Дія несприятливих чинників зумовлює пошкодження асиміляційного апарату, скорочення вегетації, зниження інтенсивності ростових та генеративних процесів і, загалом, до зменшення тривалості життя міських насаджень. Тому, вельми актуальним є вивчення комплексного впливу негативних урбогенних факторів на життєвість деревних порід з метою добору стійких до несприятливих умов міського середовища видів, підвищення продуктивності та декоративності зелених насаджень, посилення їх рекреаційних, санітарно-гігієнічних, естетичних, захисних та інших функцій.

Мета цієї публікації полягає в виявленні закономірності адаптації деревних рослин в урбаністичній екосистемі за функціональними змінами в їхньому асиміляційному апараті й охарактеризувати декоративні види щодо використання їх для оптимізації міського середовища.

Умови та методика досліджень

У якості дослідних об'єктів використовували наступні види деревних рослин: липа дрібнолиста (Tilia cordata) та гіркокаштан звичайний (Aesculus hippocastanum L.), що зростали у вуличних насадженнях на різних за антропогенним навантаженням вулицях міста Вінниці, а саме вул. Хмельницьке шосе та вул. Пирогова. Контрольні рослини зростали в умовно чистій зоні в паркових і інших насадженнях на значній віддалі від автотрас.

Для оцінки забрудненості міського повітряного середовища вихлопними газами автомобілів використано біологічний метод, що базується на визначенні кількості свинцю, затримується листям деревних і кущових порід у різних умовах. Оскільки у міських умовах автотранспорт є єдиним найбільшим джерелом викидів свинцю в навколишнє середовище, кількість затриманого листям свинцю може слугувати об’єктивним показником ступеня забрудненості повітря вихлопними газами автомобілів.

Проби листя відбирали з південно-східного боку середньої частини крони. Листя ретельно протирали вологим фільтрувальним папером від пилу і, щоб уникнути вимивання елементів, швидко обполіскували дистильованою водою.

Теоретична, наукова та методологічна основа дослідження ґрунтується на біогеоценологічному принципі з використанням класичних методів, прийнятих в екології, геоботаніці, ґрунтознавстві, кліматології, дендрології, захисному лісознавстві та озеленені [3].

Зразки рослинної біомаси відбирали за ГОСТ 27262. Озолення рослинного матеріалу проводили за загальноприйнятою методикою. Вміст важких металів визначали методом атомно-абсорбціонної спектроскопії на базі науково-вимірювальні агрохімічної лабораторії кафедри екології та охорони природи ВНАУ. Дані обробляли математично на основі методів статистики за допомогою пакету багатофункціональних комп’ютерних програм.

Вміст важких металів у біомасі рослин вивчали загальноприйнятими методиками «Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства» [4].

Рослинні проби мінералізували за методом сухого озолення до повного оголення рослинного матеріалу. Кислотну екстракцію проводили з використанням нітрогенової кислоти у розведенні 1:1. Концентрацію важких металів визначали за допомогою атомно-адсорбційного спектрофотометра С- 115 (Україна).

Вміст важких металів у листі дерев і чагарників в умовах техногенного забруднення різного походження досліджували В.П. Бессонова та І.А. Зайцева. Дендрологічні особливості досліджуваних рослин розглядали за Кохно М.А., Пархоменко Л.І., Зарубенко А.У. та ін. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі [6].

За методами Б. Доспєховим «Методика полевого опыта» здійснювали статистичну обробку отриманих даних. Проведення детальних досліджень по виявленню впливу аерогенного забруднення на зелені насадження в придорожних смугах проводилось за розробленою комплексною методикою Гнатів П.С., Мазепа М.Г., Артемовська Д.В. «Буферні властивості та морфо-анатомічні ознаки листків у техногенних умовах зростання дерев» [5].

Фітоценотичні особливості досліджували за «Методи екологічних досліджень. Фітоценотичні дослідження. Частина 1» Г.І. Кравчук.

Виклад основного матеріалу

Зростання кількості населення, розширення міст, урбанізація та індустріалізація, збільшення автомобільного транспорту і концентрація його в містах призвели до значного забруднення міського середовища продуктами згорання бензину та інших видів органічного палива. В середньому на території України вихлопні гази автотранспортних засобів зумовлюють 40-45 % забруднення повітря. У межах міського середовища вони створюють більше 50 % забруднення повітря, причому у великих містах (від 0,5 млн до 1-1,5 млн жителів) на їх частку припадає 55-70 %, а в дуже великих (декілька мільйонів жителів) містах – більше 85 % від загального обсягу забруднення атмосферного повітря. Українські автомобілі «середнього віку» викидають в атмосферу у 8-10 разів більше шкідливих речовин, ніж подібні європейські. Правильне регулювання паливної системи

автомобілів дає змогу знизити кількість шкідливих речовин в 1,5 раза, а спеціальні нейтралізатори (каталітичні доспалювачі) – знизити токсичність вихлопних газів у 6 і більше раз.

У відпрацьованих газах автомобільних двигунів налічується понад 100 різних компонентів, більшість з яких токсичні та негативно впливають на людину і довкілля. Серед токсичних компонентів, які викидаються автотранспортом 73 % становлять оксиди карбону, 11 % – неметанові леткі органічні сполуки, 13 % – оксиди нітрогену, 1,6 % – сажа, 1,4 % – оксид сульфуру, сполуки свинцю (метаболіти PbO_4) (табл.1). Великий обсяг викидів від автотранспорту пояснюється, насамперед, збільшенням кількості приватного автотранспорту, експлуатацією технічно-застарілого автомобільного парку, використанням палива низької якості, аварійним станом доріг.

Таблиця 1

Склад вихлопних газів бензинових і дизельних двигунів внутрішнього згоряння

Назва речовини	Вид двигуна	
	Бензинові	Дизельні
Азот N_2, об.%	74-77	76-78
Кисень O_2, об.%	0,3-8,0	2,0-18,0
Вода H_2O (пара), об.%	3,0-5,5	0,5-4,0
Вуглекислий газ CO_2, об.%	0,0-16,0	1,0-10,0
Чадний газ CO, об.%	0,1-5,0	0,01-0,5
Оксиди нітрогену NO_x, об.%	0,0-0,8	0,0002-0,5
Вуглеводні C_mH_n, об.%	0,2-3,0	0,09-0,5
Альдегіди RCHO, %	0,0-0,2	0,001-0,009
Сажа, г/м^3	0,0-0,04	0,01-1,10
Бенз(а)пірен, г/м^3	$10\text{-}20\times10^{-6}$	10×10^{-6}
Двооксид сірки, мг/м^3	0,003	0,015
Сполуки свинцю, мг/м^3	60	–

Слід відмітити, що 40 % всіх шкідливих речовин, що потрапляють в атмосферу, є продуктами згорання автомобільного палива.

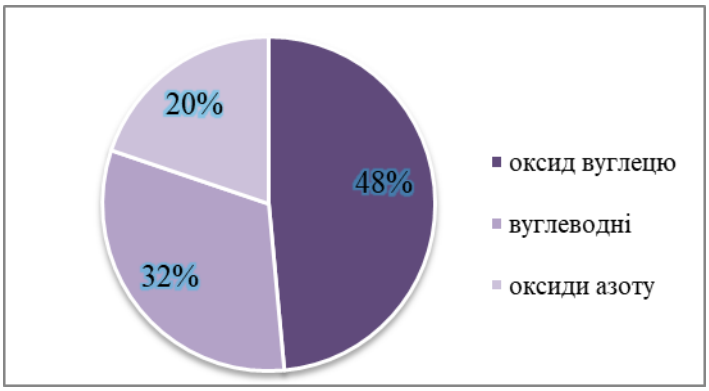


Рис. 1. Частка полютантів у вихлопних газах автомобільного транспорту в Україні

Якщо оцінювати внесок автомобільного транспорту в загальне забруднення атмосферного повітря в Україні (рис.1), то його частка за оксидом вуглецю становитиме 49 %, за вуглеводнями – 32 %, за оксидами азоту – 20 %. Разом з тим в багатьох містах України викиди автотранспорту становлять від 60 до 90 % загальної кількості викидів.

Полютанти, корті потрапляють у повітря з вихлопними газами автомобілів, мають токсикологічну дію. Серед великої кількості складових небезпеку становить все більше зростання забруднення важкими металами, особливо сполуками свинцю. Оскільки свинцевим сполукам властива нейротоксична дія (особливо небезпечна для здоров'я дітей).

У значних дозах сполуки свинцю викликають хромосомні аберації у людей. У літературі є й інші відомості, що свідчать про несприятливий вплив свинцю за умов накопичення його у зовнішньому середовищі.

Таким чином у зв'язку з швидкими темпами погіршення екологічної ситуації та загрозливого характеру змін, уже в 70-ті роки було визнано актуальність і невідкладність зосередження уваги на проблемі боротьби з забрудненням повітря, а разом з тим грунту, полютантами вихлопних газів автомобілів. Це дало поштовх обґрунтуванню відповідної тематики та розгортання робіт з вивчення, аналізу та оцінки рівня забрудненості міського середовища вихлопними газами автомобілів. Одним із перспективніших засобів захисту від дії забруднювачів було обрано озеленення [6].

Озеленення населених пунктів зазвичай представлено парками, газонами, скверами, алеями, квітниками та придорожніми смугами. У Вінницькій області існує майже 200 парків та понад 470 скверів.

За інформацією, наданою районними державними адміністраціями та виконавчими комітетами міст обласного значення, станом на 01.01.2018 року: загальна площа зелених насаджень 10961,5 га, з них 38% уражених фітозахворюваннями, а саме 1,6% потерпає від квіткових паразитів, 1,8% пошкоджені мікозами (грибами) та 34,6% уражені ентомошкідниками [6].

Зелені зони формують естетичний вигляд міст та створюють комфортні умови для життя населення. Поряд із цим зелені насадження слугують важливим елементом міської інфраструктури, оскільки мають функції зниження шуму, очищення повітря, а також пом'якшення негативних наслідків зміни клімату.

Актуальність збереження зелених зон збільшується у містах з більшою кількістю населення, інтенсивнішим рухом автотранспорту, більшою кількістю промислових, виробничих та комунальних підприємств. Найбільша кількість людей проживає у обласному центрі місті Вінниця – 370707 осіб (на 01.01.2020 року). Так, у м. Вінниця викиди від автотранспорту досягають 80%, а у розрахунку на душу населення становить 36,7 кг, щільність викидів у розрахунку на квадратний кілометр території – 197,7 т.

Проведенні досліджень було використано біологічний метод з метою оцінки забрудненості міського повітряного середовища вихлопними газами автомобілів. Даний метод базувався на визначенні кількості свинцю, затримуваного листями деревних порід у придорожніх насадженнях з різною інтенсивністю руху автотранспорту. Кількість утримуваного листями свинцю може слугувати об'єктивним показником ступеня забрудненості повітря вихлопними газами автомобілів, оскільки у міських умовах автотранспорт є найсуттєвішим джерелом викидів свинцю в навколишнє середовище.

Об'єктом дослідження були деревні рослини, що зростали навколо доріг по вулицях з найбільшою інтенсивністю руху легкових і вантажних автомобілів, а саме магістралі загальноміського значення Хмельницькому шосе та по вул. Пирогова. Дані вулиці мають різну інтенсивність руху автотранспорту, що проходить за одиницю часу в час пік, а отже характеризуються різною кількістю забруднюючих довкілля речовин.

Максимальною утримуючою здатністю по відношенню до свинцю відрізняються листки гіркокаштана кінського (табл. 2).

Інтенсивний розвиток автомобільного транспорту і концентрація його в містах привели до значного забруднення міського середовища продуктами згорання бензину та інших видів органічного палива. Згідно з статистичними даними у світовому масштабі уже в 70-ті роки на долю автотранспортних викидів припадало близько 60 % забруднення атмосфери, на початку 90-х років - понад 70 %. За оцінками спеціалістів, уже в 70-ті роки транспорт став основним джерелом забруднення повітряного середовища у великих містах.

Таблиця 2

Кількість свинцю (мг/кг) в листі деревних рослин м. Вінниці

Вид	Місцезростання рослин	Вміст свинцю, мг/кг
Гіркокаштан кінський	Хмельницьке шосе	5,55
	вулиця Пирогово	3,75
Липа дрібнолиста	Хмельницьке шосе	5,2
	вулиця Пирогово	4,44

Максимальні величини накопичення свинцю в листках деревних рослин відмічені по вул. Хмельницьке шосе з більшою інтенсивністю легкового автотранспорту.

За проаналізованими даними, у фітомасі дендрофлори, котра зростає поряд із проїжджою частиною міських вулиць за вегетаційний період в деяких випадках може накопичувалося в 20-40 разів більше сполук свинцю порівняно з фоновим вмістом (у глибині парків, на значній віддалі від автомагістралей). Основна маса полютанта осідає на відстані до 20 м від автошляхів.

Раціонально підібраний таксономічний склад міських зелених насаджень покращує стійкість рослин до умов урбанізованого середовища і слугує запорукою вирішення питань пов'язаних з формуванням міського ландшафту та покращенням еколого-естетичної цінності територій.

Для обстежень вуличних насаджень було використано шкалу оцінки стану деревних рослин. Нами було обстежено насадження на чотирьох найбільших вулицях Вінниці, корті яскраво відображають видовий склад і загальний стан вуличних насаджень міста. За узагальненими даними, простежується досить невтішна картина стосовно розподілу дерев як за категоріями стану, так і за видовим складом.

Досить бідний асортимент деревних рослин спостерігається у вуличних насадженнях. Найповніше представлені такі породи дерев як: липа дрібнолиста, гіркокаштан кінський, тополя дельтолиста, клен гостролистий та ялина звичайна.

Половина обстежених дерев відповідають вимогам фітомеліоративних та декоративних функцій та оцінена 4 та 5 балами згідно шкали оцінки стану деревних рослин.

Поряд із цим придорожні зелені насадження уражуються омелою білою (Viscum album L.). Здебільшого бал пошкодження становить 3-5 бали. При цьому уражаються верхні частини крон, гілки 2-5-річної давності. Більшість дерев, які пошкоджені омелою, мають вік 50-60 років та більше, оскільки у старшому віці стійкість дерев до ураження значно знижується [6].

Для цілей біоіндикації забрудненості навколишнього середовища особливої уваги серед деревних рослин заслуговують хвойні породи.

В м. Вінниці проводилось дослідження в дев'яти місцях зростання насаджень ялини звичайної, а саме, в Лісопарку, на Проспекті-Космонавтів, в Подільському ботанічному саду, в Національному музей-садибі М.І. Пирогова, в Парку ім. лікаря О.І. Ющенка, в Парку Дружби народів, на вул. Привокзальній, в П'ятничанському парку та в Центральному міському парку. Дані місця є найбільш типовими для м. Вінниці, а також і його околиць. Всі ялини зростаючі в цих місцях є штучно насадженими.

При проведенні досліджень було охарактеризовано приблизно 345 дерев різного віку. Стан ялини європейської у різних місцях зростання досить сильно відрізняється, а саме, характер пошкоджень (уражень) дерев, ступінь пошкодження та рівень пошкодження.

Найбільший відсоток висохлих дерев спостерігається у Національному музеї-садибі М.І. Пирогова (85%), Подільському ботанічному саду (70%) та Парку Дружби народів (70%). Така ситуація у Національному музеї-садибі М.І. Пирогова обумовлена тим, що вік дерев більше 50 років, а після 30 років ялина стає менш витривалою до кліматичних умов, які не відповідають оптимальним для її зростання. Ослаблені цим ялини, уражуються кореневою губкою, яка викликає розвиток кореневих гнилей. В наслідок цього дерева ще більше слабшають і їх заселяють стовбурові шкідники, і дерево поступово гине (всихає). У Подільському ботанічному саду ситуація схожа, але додається ще одна дуже важлива особливість. Всихання дерев тут пришвидшило дуже щільне насадження дерев ялини. Можна підсумувати, що з віком ялина стає дуже вразливою до не сприятливих кліматичних умов. Тому ситуація з її насадженнями у Вінниці та Вінницькій області з кожним роком погіршується.

Утримання зелених насаджень у місті Вінниця ведеться без врахування наукових рекомендацій: не завжди дотримуються правил та термінів обрізки дерев, широке застосування топінгової обрізки тощо. Не забезпечуються достатні умови для росту та розвитку рослин. Зокрема, непоодинокі приклади, коли стовбур дерева майже впритул оточується асфальтним покриттям або тротуарною плиткою.

Такі тенденції погіршують стан зелених насаджень міст, їх зовнішній вигляд, підвищується пилове забруднення, змінюються інші показники якості повітря.

Підсумовуючи сліз зазначити, що придорожні насадження міста потребують проведення в них санітарно-оздоровчих заходів, удосконалення агротехніки створення насаджень та догляду за ними з врахуванням особливостей умов місцезростання на вулицях міста.

Методи біоіндикації забрудненості природного середовища набувають більш широкого вжитку, оскільки рослини мають високу чутливість і специфічні реакції на конкретні забруднювачі, високу інтенсивність газообміну з оточуючим середовищем, котра в рази вища, ніж у представників тваринного світу. А отже, стає можливим отримання узагальнених показників реакцій-відповідей на дію антропогенних факторів у комплексі.

Висновки

Загальний сучасний стан та таксономічний склад міських зелених насаджень і умови місцезростання рослин в урбанізованому середовищі є однією з важливих передумов успішного вирішення комплексу питань, пов'язаних з формуванням міського ландшафту і поліпшення його еколого-естетичної цінності.

Підсумовуючи, відзначимо, що вуличні насадження міста потребують проведення в них екстрених санітарно-оздоровчих заходів, удосконалення агротехніки створення насаджень та догляду за ними з врахуванням особливостей умов місцезростання на вулицях міста.

Література

1. Кохно М.А. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі. Покритонасінні / М.А. Кохно, Л.І. Пархоменко, А.У. Зарубенко та ін. – К.: Фітосоціоцентр, 2002. – 424 с.

2. Кравчук Г.І. Методи екологічних досліджень: фітоценотичні та созологічні підходи. Навчально-методичний посібник / Г.І. Кравчук, О.О. Кравчук, Г.В. Мудрак, С.Л. Кушнір. – Вінниця: ВНАУ, 2013. – 114 с.

3. Архіпова Г. І. Аналіз впливу відпрацьованих автомобільних газів на стан атмосферного повітря в густонаселених районах / Г. І. Архіпова, І. С. Ткачук, Є. І. Глушков // Вісник НАУ. – 2009. – № 1.

4. Дудник Є.Г. Вплив антропогенних та природних чинників на стан дендрофлори урбоекосистем Вінницької області / Є.Г. Дудник // Науковий журнал «Сільське господарство та лісівництво». – Вінниця: ВНАУ, 2018. – 153-163 с.

5. Доповідь про стан навколишнього природного середовища у Вінницькій області (2019 рік) / Вінницька обласна державна адміністрація Департамент агропромислового розвитку, екології та природних ресурсів. – 2020. – 116 с.

6. Матусяк М. В. Біолого-екологічні особливості поширення омели білої (viscum album) в умовах м. Вінниця / М. В. Матусяк // Науковий вісник НЛТУ України. - 2019. - Т. 29, № 8. - С. 66-69.

References

1. Kokhno M.A. Dendroflora Ukrainy. Dykorosli y kultyvovani dereva i kushchi. Pokrytonasinni / M.A. Kokhno, L.I. Parkhomenko, A.U. Zarubenko ta in. – K.: Fitosotsiotsentr, 2002. – 424 s.

2. Kravchuk H.I. Metody ekolohichnykh doslidzhen: fitotsenotychni ta sozolohichni pidkhody. Navchalno-metodychnyi posibnyk / H.I. Kravchuk, O.O. Kravchuk, H.V. Mudrak, S.L. Kushnir. – Vinnytsia: VNAU, 2013. – 114 s.

3. Arkhipova H. I. Analiz vplyvu vidpratsovanykh avtomobilnykh haziv na stan atmosfernoho povitria v hustonaselenykh raionakh / H. I. Arkhipova, I. S. Tkachuk, Ye. I. Hlushkov // Visnyk NAU. – 2009. – № 1.

4. Dudnyk Ye.H. Vplyv antropohennykh ta pryrodnykh chynnykiv na stan dendroflory urboekosystem Vinnytskoi oblasti / Ye.H. Dudnyk // Naukovyi zhurnal «Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo». – Vinnytsia: VNAU, 2018. – 153-163 s.

5. Dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Vinnytskii oblasti (2019 rik) / Vinnytska oblasna derzhavna administratsiia Departament ahropromyslovoho rozvytku, ekolohii ta pryrodnykh resursiv. – 2020. – 116 s.

6. Matusiak M. V. Bioloho-ekolohichni osoblyvosti poshyrennia omely biloi (viscum album) v umovakh m. Vinnytsia / M. V. Matusiak // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. - 2019. - T. 29, № 8. - S. 66-69.

Надійшла / Paper received : 25.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-56-61
УДК 621.01

М. М. КОСІЮК, А. М. КОСІЮК, В. С. КРАВЧУК
Хмельницький національний університет

ПРОЕКТУВАННЯ ОБОРОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРЯМКУ РУХУ

В статті розглядаються механізми для перетворення обертального руху в коливальний рух і навпаки. Метою роботи є узагальнення відомостей щодо проектування перетворювача напрямку руху, який сприяв би створенню машин з більш зручною компоновкою.

Пропонується оригінальний сферичний кривошипно-повзунний механізм для оборотних перетворювачів напрямку руху, у якому геометричні осі усіх установлених з можливістю обертання деталей перетинаються в одній «центральній» точці, при цьому немає потреби у балансуванні інерційних мас, немає вібрації, досягаються високі характеристики з надійності та ресурсу роботи. Перетворювач напрямку руху може використовуватися у різних механізмах, пристроях, машинах і виконувати різні функції.

Використання оборотного перетворювача напрямку руху у різних галузях дозволяє отримати значний економічний ефект. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу оборотного перетворювача напрямку руху, що важливо для його практичного використання.

Ключові слова: перетворювач напрямку руху, кривошипно-повзунний механізм, машини об'ємного витискання, трансмісії, двигуни, компресори, насоси.

M. KOSIYUK, A. KOSIYUK V. KRAVCHUK
Khmelnytskyi National University

DESIGN OF MOVEMENT DIRECTION REVERSE CONVERTER

Direction transducers are used in many branches of mechanical engineering to convert the continuous rotation of the master link into reciprocating or reciprocating oscillating motion of the slave and, conversely, to convert the reciprocating motion into continuous. They are used in motion-converting mechanisms, internal combustion engines, reciprocating compressors and pumps, reciprocating feeders and other technological equipment. Designing mechanisms for converting rotational motion into oscillating motion and vice versa is an extremely important task.

The present article deals with the mechanisms for converting rotational motion into oscillatory motion and vice versa. The purpose of the work is to summarize information about the design of a motion direction converter, which would contribute to the creation of machines with a more convenient layout.

The invention proposes an original spherical crank-slider mechanism for reversible motion direction converters, in which the geometric axes of all parts installed with the possibility of rotation intersect at one "central" point, while there is no need for balancing inertial masses, no vibration, high reliability and service life characteristics are achieved. The direction converter can be used in various mechanisms, devices, machines and perform various functions.

The use of a reversible direction converter in various industries allows obtaining a significant economic effect. The work is planned to be continued in terms of optimization synthesis of the reverse converter of the direction of movement, which is crucial for its practical use.

Key words: motion direction converter, crank-slider mechanism, volumetric squeezing machines, transmissions, motors, compressors, pumps.

Вступ. Перетворювачі напрямку руху (ПНР) застосовуються в багатьох галузях машинобудування для перетворення безперервного обертання ведучої ланки в зворотно-поступальний або зворотно-коливний рух веденої і, навпаки, для перетворення поворотного руху в безперервний. Їх використовують в механізмах, що перетворюють рух, двигунах внутрішнього згоряння, поршневих компресорах і насосах, поршневих живильниках та в іншому технологічному обладнанні. Проєктування механізмів для перетворення обертального руху в коливальний рух і навпаки є надзвичайно актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В історії техніки навряд чи можна знайти пристрої, яким приділялося б стільки уваги, скільки випало на долю механізмів перетворення зворотно-поступального руху в обертальний. З часів Дж. Пакарда, (1780 р - патент на кривошипно-шатунний механізм (КШМ)) і Дж. Уатта (1784 г. - перша парова машина з КШМ) тисячі винахідників різних країн і поколінь натхненно шукали ідеальну схему, вільну від недоліків КШМ. Особливо інтенсивно цей процес проходив в XX столітті і триває досі [1].

КШМ відрізняється простотою, технологічністю і надійністю, однак він має такі недоліки, як неврівноваженість поступально рухомих і обертових мас, що призводить до збільшення маси механізму, наявність «мертвих точок», значний простір, необхідний для руху, а також неможливість відтворення необхідного закону руху повзуна (поршня).

Існують перетворювачі руху, які відмінні від КШМ і мають кращі масогабаритні показники: механізми з плоскою і просторовою обертовими шайбами, механізм з хитною шайбою, механізм "Жіродін", кривошипно-карданний перетворюючий механізм тощо [2].

Авторами пропонується оригінальний сферичний кривошипно-повзунний механізм для оборотних ПНР, у якому геометричні осі усіх установлених з можливістю обертання деталей перетинаються в одній «центральній» точці [3-5]. Він і є об'єктом дослідження.

Мета статті - узагальнення відомостей щодо проектування оборотного ПНР на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму.

Виклад основного матеріалу дослідження. Підвищення продуктивності та надійності машин об'ємного витиснення має важливе народногосподарське значення. На нашу думку, перспективним є використання оборотного ПНР на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму зокрема, як виконавчого механізму компресорів, насосів, пневмо- і гідромоторів, а також у складі трансмісій інших пристроїв [4, 5].

На рис. 1 представлена конструктивна схема оборотного ПНР. В корпусі 1 (верхня частина корпусу і кришки підшипникового вузла не показані) якого встановлено ротор, що включає в себе два вали 2 і 3 з прямолінійними кінцевими і робочим ділянками, які мають при поєднанні Z-подібну форму, причому ротор встановлено в протилежних співвісних підшипниках 4 і 5, центр симетрії середньої частини Z-подібної робочої ділянки ротора збігається з його віссю обертання, кут між поздовжніми осями кінцевих ділянок і середньою частиною Z-подібної робочої ділянки перевищує 0°, але менший 90°, а кінематичний і силовий зв'язок здійснюється через підшипник 6, внутрішнє кільце якого закріплено на Z-подібній робочій ділянці, повзуна 7, виконаного на основі зовнішнього кільця зазначеного підшипника, щонайменше, одного шипа 8 і підшипникового вузла 9, що забезпечує зв'язок між повзуном 7 і коливальною кінематичною ланкою, виконаною у вигляді обойми 10, яка з безперервним зазором вільно охоплює повзун 7, встановлена у корпусі 1 в двох протилежних співвісних підшипниках 11 і 12 так, що їх спільна геометрична вісь перпендикулярна геометричній осі ротора і жорстко зв'язана з встановленими в зазначених підшипниках двома валами 13 і 14, які виступають за межі корпуса 1 перетворювача напрямку руху з його протилежних сторін.

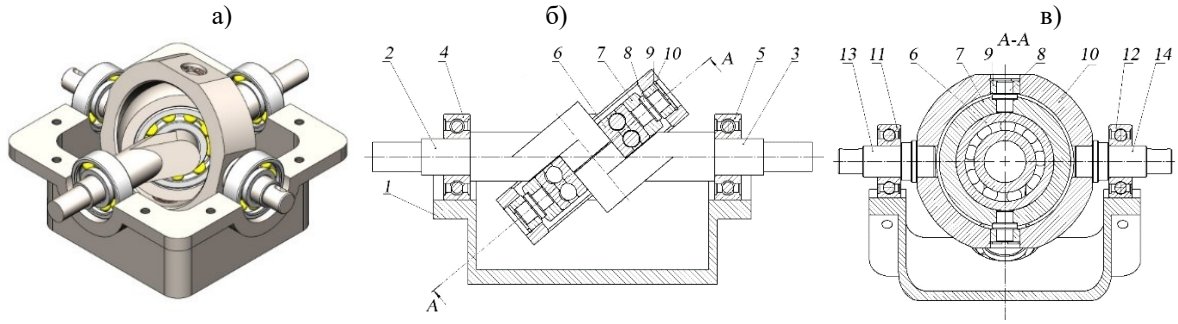


Рис. 1. Конструктивна схема ПНР:
а – просторова схема ПНР; б - поздовжній розріз ПНР по ротору; в - розріз А-А перетворювача напрямку руху.

В залежності від технічних характеристик оборотного перетворювача напрямку руху, умов експлуатації можливі різні конструктивні варіанти його виконання. На рис. 2. представлені конструктивні схеми кривошипно-повзунного механізму оборотного ПНР на основі: підшипника ковзання; підшипника кочення і здвоєного циліндричного підшипникового вузла.

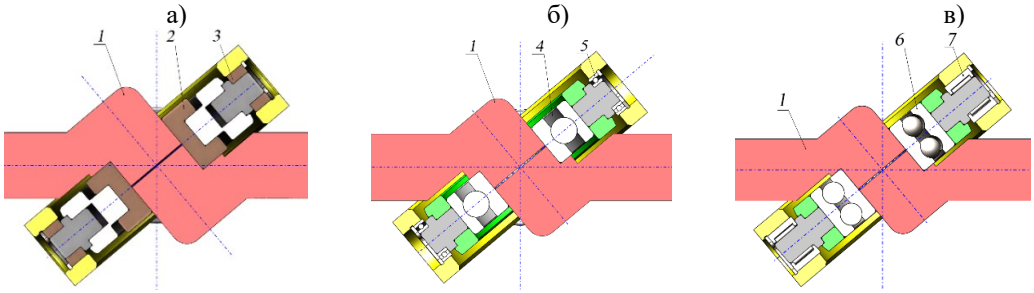


Рис. 2. Конструктивні схеми кривошипно-повзунного механізму оборотного ПНР на основі:
а –підшипника ковзання; б –підшипника кочення; в - здвоєного циліндричного підшипника кочення;
1 - кривошип; 2 - підшипник ковзання; 3 - підшипник ковзання; 4 - підшипник кочення; 5 - підшипник кочення; 6 - здвоєний підшипник кочення; 7 - голковий підшипник.

Унікальність сферичного кривошипно-повзунного механізму оборотного перетворювача напрямку руху полягає в тому, що осі симетрії всіх деталей, які обертаються і рухаються, перетинаються лише в одній «центральній» точці, при цьому немає потреби у балансуванні інерційних мас, відсутня вібрація, досягаються високі характеристики з надійності та ресурсу роботи.

Проведено комплекс віртуальних досліджень оборотного ПНР у програмному продукті SolidWorks Simulation. Це дозволяє ще на стадії проектування швидко провести імітаційне моделювання та розрахунки методом кінцевих елементів з досить високим ступенем достовірності, отримати та проаналізовати результати моделювання, як у числовому, так і графічному вигляді. На рис. 3 представлена кінцево-елементна модель і фрагмент звіту інженерного аналізу ПНР. Проведені моделювання дозволяють поліпшити якість проектування, визначити граничні рівні навантажень і деформацій при прикладених

навантаженнях, при цьому отримувати точні результати для критичних компонентів, оптимізувати конструкцію ПНР та деталей й уникнути непотрібних витрат на матеріал. Спираючись на результати комп'ютерного проектування і комп'ютерного інжинірингу, можна зробити конструкцію ПНР економічно вигіднішою і практичнішою.

а) б)

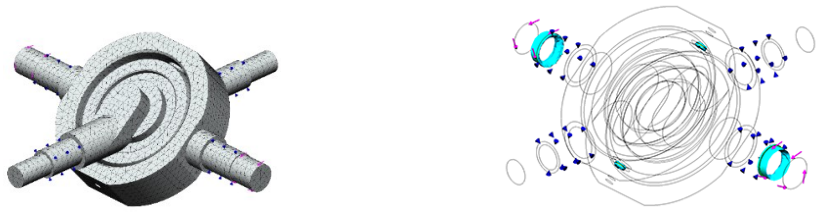


Рис. 3. Моделі перетворювача напрямку руху:
а - кінцево-елементна модель ПНР; б – фрагмент звіту інженерного аналізу ПНР;.

На ранніх етапах проектування ПНР перед розробниками постає питання про працездатність механізму в цілому, причому з точки зору не тільки забезпечення міцності окремих його частин, а й взаємодії частин і вузлів у процесі роботи. Використовуючи розрахункову схему, представлену на рис. 4, отримано аналітичні залежності, які можуть використовуватися при проектуванні ПНР [6,7].

а) б)

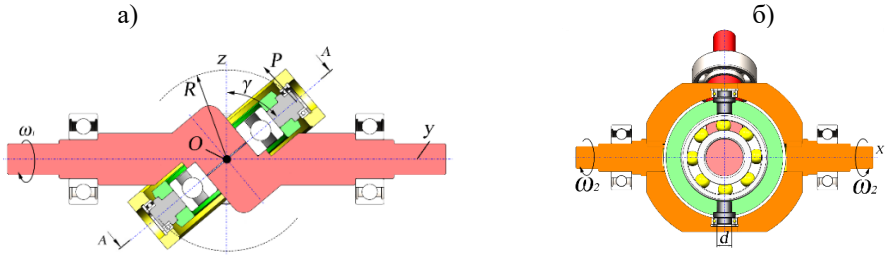


Рис. 4. Розрахункова схема ПНР:
а - поздовжній розріз по вхідному валу; б - розріз А-А по вихідних валах.

Кінематичне рівняння обертального руху має вигляд:

$$\varphi = f(t).$$

де φ – кут повороту (кутове переміщення).
Кутове переміщення вхідного валу

$$\varphi_1 = \omega_1 t,$$

де кутова швидкість вхідного валу ω_1

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{\pi n_1}{30}.$$

Оскільки кутова швидкість вхідного вала $\omega_1 = \text{const}$, то кутове прискорення

$$\varepsilon_1 = 0.$$

Значення кутової швидкості вихідних валів визначається за формулою:

$$\omega_2 = \omega_1 \tan\gamma \sin\varphi_1 = \omega_1 \tan\gamma \sin\omega_1 t,$$

де $\gamma = const$, кут нахилу кривошипа.

Кутове прискорення вихідних валів визначається за формулою:

$$\varepsilon_1 = \omega_1^2 \tan\gamma \cos\varphi_1 = \omega_1^2 \tan\gamma \cos\omega_1 t$$

Переміщення обойми визначається за формулою:

$$S = R\tan\gamma\ (1-\cos\varphi_1) = R\tan\gamma\left(1-\cos\omega_1 t\right).$$

При *t=0* переміщення $S = 0.$

Передаточне число ПНР визначається за формулою:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1\ \tan\gamma\sin\varphi_1}{\omega_1} = \tan\gamma\ \sin\omega_1 t.$$

На практиці часто бувають заданими не моменти (*Мк*, *Н·м*), прикладені до валів, а потужності (*N*, *кВт*), які передаються на них або знімаються з них, а також число обертів вала за хвилину (*n, об/хв.*). Залежність між цими величинами:

$$N = \frac{\pi n M_к}{30}\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{с}}\ .$$

$$N = \frac{\pi n M_к}{1000\cdot 30}кВт.$$

$$M_к = 9549\frac{N}{n}Н\cdot м$$

де *N* - виражено в кіловатах, а *n* - у обертах за хвилину.

На шип повзуна ПНР діє сила *P* (рис.4). Величина цієї сили визначається за формулою:

$$P = \frac{M_з}{2R}\ ,$$

де $M_з$ – згинальний момент у небезпечному перерізі шипа, Н·м: *R* – відстань від осі до середини шипа, *м*.

Сила *P* діє на шип повзуна викликаючи його згин і зріз.

$$\sigma_з = \frac{M_з}{W} \le \left[\sigma\right]_з\ .$$

W – момент опору згину, м^3:

$$W = \frac{\pi d^3}{32}\ ,$$

де *d* – діаметр шипа кривошипа, м.

Оскільки на шип повзуна діє зусилля зрізу *P*, то справедлива залежність:

$$\tau = \frac{P}{F}\ ,$$

де *F* – площа:

$$F = \frac{\pi d^2}{4}\ .$$

Здійснюють перевірку умови міцності шипа, порівнюючи величину визначених напружень з допустимими напруженнями згину і зрізу для матеріалу шипа

$$\sigma_з\ \le\left[\sigma\right]_з\ ;\ \tau_{зр}\ \le\left[\tau\right]_з\ ,$$

де $\left[\sigma\right]_з$ - допустиме напруження згину і $\left[\tau\right]_з$ - допустиме напруження зрізу для матеріалу шипа.

Значення кутової швидкості і кутового прискорення вихідних валів залежно від кута повороту вхідного вала визначені в системі Mathcad представлені в таблиці 1. Графік залежності - на рис.5.

Таблиця 1.

Значення кутової швидкості і кутового прискорення вихідних валів при різних кутах повороту вхідного вала

Кут повороту вхідного вала, φ град.	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Кутова швидкість вхідного валу, ω_1 рад/с	52,36	52,36	52,36	52,36	52,36	52,36	52,36	52,36	52,36
Кутова швидкість вихідного валу, ω_2 рад/с	0	37,02	52,36	37,02	0	-37,02	-52,36	-37,02	0
Кутове прискорення вихідного валу, ε_2 рад/с^2	2741	1938	0	-1938	-2741	-1938	0	1938	2741

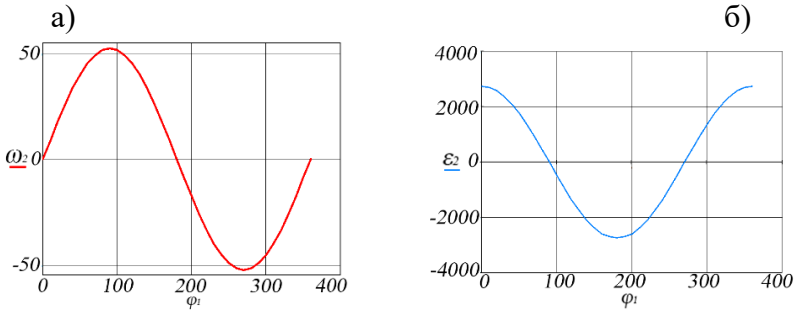


Рис.5. Значення кутової швидкості (а) і кутового прискорення (б) вихідних валів залежно від кута повороту вхідного вала

Аналіз показує, що кутові прискорення вихідних валів в крайніх положеннях малі. Це є позитивною властивістю ПНР. Вихідний вал плавно підходить до крайнього положення і різко розганяється в місцях, близьких до середнього положення, де виникає максимальна кутова швидкість. Такий режим коливання валів не вимагає установки гальм (демпферів).

Оборотний ПНР виготовляють з використанням відомих у промисловості матеріалів, устаткування та інструментів. Він може виконувати різні функції і використовуватися у різних механізмах, пристроях, машинах:

1) механізм переривчастого руху із зупинками, які служать для:
   - висадки головок цвяхів, болтів, ковпаків, корпусів конденсаторів та інших виробів у холодно-висадочних автоматів;
   - висадки та вирубки у пресах і молотах;
   - повороту стерна корабля та елеронів у літаках;
   - хитання і повороту заслінок та ін.
2) в машинах із зворотнім рухом виконавчих органів:
   - швейних – для хитання вертикального вала, в механізмах подачі рейки, голки та протягувача нитки з одночасним обертанням головного вала машини;
   - в ткацьких і в’язальних верстатах;
   - в тісто- і бетономішалках;
3) тихохідні гідронасоси:
   - для перекачування різних рідин при порівняно невеликих тисках (до 2 МПа) і великих подачах;
   - свердловинні: для перекачки нафти, газу, води із великими подачами;
4) високомоментні гідро- і пневмодвигуни;
5) доїльні апарати;
6) двигуни:
   - внутрішнього згорання (дво-, три- і чотирьохтактні);
   - зовнішнього згорання:
   - які працюють на енергії стиснутих газів;
7) компресори і вакуумні апарати;
8) високопродуктивні, але тихохідні та малогабаритні холодильні компресори для побутових і промислових холодильників;
9) гідромасажери з пульсуючими струменями;
10) гідровібратори та гідропульсатори, які можна використовувати у машинобудуванні, будівництві, транспорті, гірничій справі (гідро ударники), сільському господарстві, медицині тощо.

Використання оборотного ПНР на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму у різних галузях дозволяє отримати значний економічний ефект.

Висновок. У роботі розглянуто конструктивні і функціональні особливості сферичного кривошипно-повзунного механізму для перетворення обертального руху в коливальний рух і навпаки. Наведено результати віртуального експерименту, проведеного на основі твердотільного моделювання механізму ПНР у програмному продукті SolidWorks Simulation. Отримано аналітичні залежності, які можуть використовуватися при проектуванні ПНР. У програмному продукті MathCAD визначені значення кутової

швидкості і кутового прискорення вихідних валів залежно від кута повороту вхідного вала. Оборотний ПНР може використовуватися, як виконавчий механізм компресорів, насосів, пневмо- і гідромоторів, а також у складі трансмісій інших пристроїв. Його використання у різних галузях дозволяє отримати значний економічний ефект. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу оборотного ПНР, що важливо для його практичного використання.

Література

1. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике: Пособие для инженеров, конструкторов и изобретателей. – В 7 т. – М.: Наука, 1979–1981.
2. Чистяков В. К. Динаміка поршневих і комбінованих двигунів внутрішнього згоряння. - М .: Машинобудування, 1989. - 256 с..
3. Косіюк М.М. Кінематичний аналіз сферичного кривошипно-повзунного механізму / Косіюк М.М., Кравчук В.С. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 6. – С. 7–11.
4. Косіюк М.М. Модульна оборотна машина об'ємного витіснення / Косіюк М.М., Косіюк А.М., Кравчук В.С. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 3. – С. 105–108.
5. Патент 143170 Україна, МПК F01C 9/00, F04C 9/00. Оборотна машина об'ємного витіснення з коливальним рухом робочих органів: / Косіюк М.М., Косіюк А.М., Кравчук В.С - № u 2020 01307; заявл. 27.02.2020; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13.
6. Кіницький Я. Т. Практикум із теорії механізмів і машин / Я. Т. Кіницький. – Вид. 2-ге. – Л.: Афіша, 2004. – 453 с.
7. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин в системі Mathcad: навч. посіб. / Я. Т. Кіницький, В. О. Харжевський, М. В. Марченко. – Хмельницький : ХНУ, 2014. – 295 с.

References

1. Artobolevskyi Y. Y. Mekhanyzmы v sovremennoi tekhnyke: Posobye dlia ynzhenerov, konstruktorov y yzobretatelei. – V 7 t. – M.: Nauka, 1979–1981.
2. Chystiakov V. K. Dynamika porshnevykh i kombinovanykh dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia. - M .: Mashynobuduvannia, 1989. - 256 s..
3. Kosiiuk M.M. Kinematychnyi analiz sferychnoho kryvoshypno-povzunnoho mekhanizmu / Kosiiuk M.M., Kravchuk V.S. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2019. – № 6. – S. 7–11.
4. Kosiiuk M.M. Modulna oborotna mashyna obiemnoho vytisnennia / Kosiiuk M.M., Kosiiuk A.M., Kravchuk V.S. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2020. – № 3. – S. 105–108.
5. Patent 143170 Ukraina, MPK F01C 9/00, F04C 9/00. Oborotna mashyna obiemnoho vytisnennia z kolyvalnym rukhom robochykh orhaniv: / Kosiiuk M.M., Kosiiuk A.M., Kravchuk V.S - № u 2020 01307; zaiavl. 27.02.2020; opubl. 10.07.2020, Biul. № 13.
6. Kinytskyi Ya. T. Praktykum iz teorii mekhanizmiv i mashyn / Ya. T. Kinytskyi. – Vyd. 2-he. – L.: Afisha, 2004. – 453 s.
7. Kinytskyi Ya. T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn v systemi Mathcad: navch. posib. / Ya. T. Kinytskyi, V. O. Kharzhevskyi, M. V. Marchenko. – Khmelnytskyi : KhNU, 2014. – 295 s.

Надійшла / Paper received : 24.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-62-66
УДК 621.9.06

М.П. МАЗУР
Хмельницький національний університет

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КРУГЛОЇ РІЗАЛЬНОЇ ПЛАСТИНКИ ІЗ ПОЗИТИВНИМ ЗАДНІМ КУТОМ

В роботі розглядаються питання розрахунку температурного поля на передній і задній поверхнях круглої різальної пластинки. Нерівномірність інтенсивності теплових джерел враховується розбиттям їх на елементарні джерела уздовж різальної кромки. Приймається, що температура у будь-якій точці є сумою температур, які створюються в цій точці кожним із елементарних джерел. Для вирішення цієї задачі слід знати координати центра кожного джерела відносно точки, де розраховується температура. Одержані шукані залежності в загальному виді, а також показані особливості їх застосування для круглих різальних пластинок.

Ключові слова: температурне поле при різанні, кругова різальна кромка, джерела тепла, відносні координати джерел тепла

MYKOLA PETROVYCH MAZUR,
Khmelnytskyi National University

THE CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF A CUTTING TOOL INSERT WITH A POSITIVE CLEARANCE ANGLE

This work addresses the question of calculating the temperature fields of the rake and flank faces of a cutting tool insert. During the cutting process with such inserts, irregularities of the thickness of the cut layer along the cutting edge occur, along with the length of contact of the shavings on the front surface and the difficulty of the formation of the shavings due to their deformation occurring in differing directions. This causes irregularities in the intensity of heat sources along the cutting edge and the front surface of the instrument. In this work, this irregularity is accounted for by dividing the contact zone into small areas-sources along the cutting edge and the front surface in the direction of the flow of the shavings. It is assumed that the temperature in any point of contact is equal to the sum of the temperatures which are created at that point by each of the heat sources. To calculate these temperatures it is required to know the spatial coordinates of the heat sources on the front and back faces of the instrument relative to the specified point. This orientation is influenced by the form of the cutting edge of a specific tool, its location relative to the vector of cutting speed, and the form of the front surface of the instrument on each of the individual elementary sections (the presence of chamfers, grooves, etc.) After geometric transformations, the relations for the calculation of coordinates are given and the peculiarities of their uses in various models of the location of the heat source and the point in which the temperature is calculated are shown. The work shows the peculiarity of using the obtained technique for the case of working with a circular plate with a positive back angle. Such plates are installed with the surface of the cutting edge perpendicular to the cutting speed. Therefore the relative coordinates of the heat sources for a circular cutting edge are defined by the center coordinates of the point sources relative to the point where the temperature is calculated.

Keywords: Temperature field during cutting, circular cutting edge, heat sources, relative coordinates of heat sources.

Постановка проблеми

Розроблені багатьма авторами термомеханічні моделі процесу різання [1, 2] стосувалися вільного різання із постійними вздовж різального леза умовами оброблення або варіантів, які могли би бути зведені до вільного різання (відсутність заокруглення вершини і кут загострення в плані $\varepsilon = 90°$). На практиці же більш поширені інструменти із заокругленою деяким радіусом місця переходу від головної до допоміжної різальних кромок. Ця ділянка, особливо характерна для непереточуваних пластинок, може займати значну частину активного різального леза або все різальне лезо може мати кругову форму.

Аналіз останніх джерел

Розглядаючи аналогічну задачу, P.Oxley [3] ввів поняття еквівалентної різальної кромки, перпендикулярної до напрямку сходу стружки. Для розрахунку цього напрямку стружка приймалась як ряд елементів нескінченно малої ширини, на кожнім з яких діють сили тертя, перпендикулярні до елементарної ділянки різальної кромки. Рівнодіюча цих сил приймалась за напрям сходу стружки, а кут між ним і перпендикуляром до головної різальної кромки розраховувався.

Такий підхід, на наш погляд, цілком допустимий при визначенні сил різання, коли всі елементарні різальні леза можуть розглядатись окремо, має цілий ряд обмежень для його прямого застосування при аналізі контактних теплових процесів:

а) геометричні параметри різальної частини приймаються постійними для всієї еквівалентної різальної кромки, тоді як на дійсному різальному лезі вони, як правило, змінні, особливо на криволінійній ділянці;

б) для врахування взаємовпливу елементарних теплових джерел, що діють на передній і задній поверхнях, необхідно знати їх реальне розміщення в просторі, а не зведене до однієї прямолінійної різальної кромки;

Тому при аналізі контактних процесів на криволінійному різальному лезі із змінними умовами різання зведення його до еквівалентного різального леза з постійними умовами не є обґрунтованим і може призвести до спотворення реальної картини.

Метою роботи є: Розроблення методики використання термомеханічної моделі різання саме для процесу оброблення циліндричних деталей круглими непереточуваними пластинками із позитивним заднім кутом.

Виклад основного матеріалу

Рис.1. Схема розбиття шару, зрізуваного круговою різальною кромкою

В даній задачі пропонується замінити реальне кругове різальне лезо – ступінчастим із K_∂ ділянок (рис.1), де ширина кожного елементарного різального леза буде дорівнювати ширині елемента зрізуваного шару $2\cdot\Delta b$, виміряного перпендикулярно напрямку сходу стружки. В роботах М.І. Клушина [4] та С.С. Сіліна [5] цим напрямком приймався перпендикуляр до лінії, що з‘єднує точки початку і кінця зрізуваного шару.

Для аналізу умов роботи на кожній ділянці конкретна геометрія загострювання інструмента має бути перерахована у кожній ділянці на напрямок сходу стружки [6].

Для аналізу картини розподілу теплових потоків з боку інструмента представимо форму його передньої і задньої поверхонь в вигляді N_1 прямолінійних ділянок $\Delta l_{1j} = l_{1j} / N_1$ (рис. 2). Кожна з ділянок на передній поверхні нахилена під кутом $\gamma_{jk}, \left(j = 1...K_\partial\right)$, що визначається конкретною формою передньої поверхні. Температура середин контактних ділянок з боку інструмента в цих ділянках буде визначатися сумою температур, створюваних усіма джерелами q_{1k} і q_{2k} ($k = 1...N_1$), розміщених на кожній $j-$й ділянці різальної кромки [1]:

$$\theta_{1mi} = \sum_{j=1}^{K\partial}\cdot\sum_{k=1}^{N_1} T_{1mijk}\cdot q_{1jk} + \sum_{j=1}^{K\partial}\cdot\sum_{k=1}^{N_1} T_{2mijk}\cdot q_{2jk} \;;$$

$$\theta_{2mi} = \sum_{j=1}^{K\partial}\cdot\sum_{k=1}^{N_1} T'_{1mijk}\cdot q_{1jk} + \sum_{j=1}^{K\partial}\cdot\sum_{k=1}^{N_1} T'_{2mijk}\cdot q_{2jk}\,, \qquad (1)$$

$$\text{де } T_{1mijk} = \frac{\Im_{1mijk}}{2\cdot\pi\cdot\lambda_i}\,;$$

$\Im_{1mijk}$ – інтегральна функція, що визначає температуру в *i-й* точці *m*-ї ділянки різальної кромки, створювану *k*-м плоским джерелом з розмірами $\left(2\cdot b\right)\times\Delta l_1$, розміщеним на *j*-й ділянці різальної кромки [7].

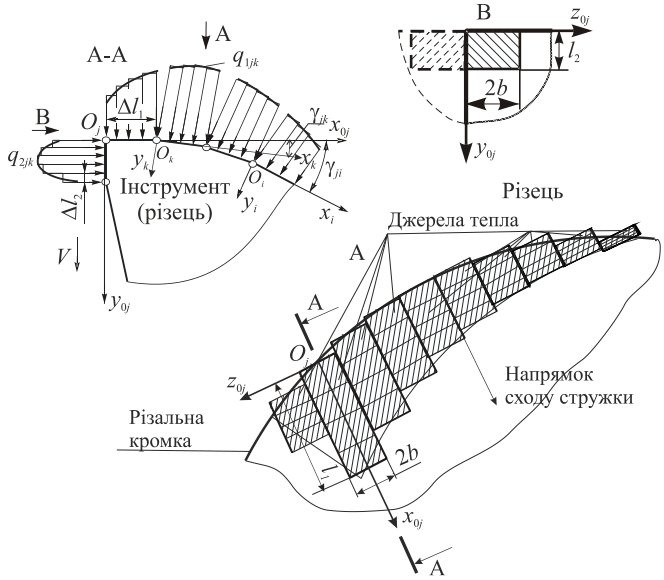


Рис. 2 Схема представлення джерел тепла нерівномірної інтенсивності вздовж передньої поверхні і різальної кромки

Точне рішення цього інтеграла вимагає знання відносних координат *X, Y, Z* - *i*-ї точки *m*-ї ділянки різального леза в системі координат *k*-го джерела *j*-ї ділянки різального леза. Кожна з цих ділянок зміщена одна відносно одної у просторі, а крім того, їх різальні кромки нахилені по відношенню до напрямку швидкості різання під кутом λ_m. Для кожного інтервалу різальної кромки введемо постійний масив центрів координат джерел q_{1jk} і q_{2jk} в системі координат $X_{0j}O_jY_{0j}$, орієнтованій віссю Y_{0j} за напрямком швидкості різання:

а) для джерел q_{1jk}:

$$X_{0j1} = 0; Y_{0j1} = 0;$$
$$X_{0jk} = X_{0jk-1} + \Delta l_{1j} \cdot \cos\gamma_{jk-1};$$
$$Y_{0jk} = Y_{0jk-1} + \Delta l_{1j} \cdot \sin\gamma_{jk-1}, \ (k = 2...N_1);$$

б) для джерел q_{2jk}:

$$X_{0jk} = 0; Y_{0jk} = (k-1) \times \Delta l_{2j}, \ (\ k = N_1 + 1...2 \cdot N_1),$$

де $\Delta l_{2j} = l_{2j} / N_1$.

Повернемо систему координат $X_{0j}O_jY_{0j}$ на кут γ_{jk} так, щоб вона стала паралельною $X_kO_kY_k$. Тоді координати центрів системи *k*-го джерела O_k на *j*-й ділянці в системі $X'_{0j}O'_jY'_{0j}$ визначаються:

$$X'_{0jk} = Y_{0jk} \cdot \sin\gamma_{jk} + X_{0jk} \cdot \cos\gamma_{jk};$$
$$Y'_{0jk} = Y_{0jk} \cdot \cos\gamma_{jk} - X_{0jk} \cdot \sin\gamma_{jk}.$$

Для розрахунку координат *i*-ї ділянки передньої поверхні *m*-го інтервалу різального леза, де буде визначатися температура, необхідно спочатку паралельно перенести систему $X_{0m}Y_{0m}Z_{0m}$ в абсолютну систему координат джерела $X_{0j}Y_{0j}Z_{0j}$, а потім послідовно повернути її на кути λ_j та γ_{jk}. Тоді після відповідних перетворень і об‘єднання формул, одержаних для джерел, що діють на передній і задній поверхнях, середина *i*-го інтервалу поверхні, де розраховується температура, в системі $X_kO_kY_k$ джерела має координати:

$$X = \left[\left(Y_{0mi} + \frac{\Delta l_{pm}}{2} \cdot \sin\gamma_{mi} - Y_{Цj} + Y_{Цm}\right) \cdot \cos\lambda_j - \left(Z_{Цm} - Z_{Цj}\right) \cdot \sin\lambda_j - Y_{0jk}\right] \sin\gamma_{jk} +$$
$$+ \left(X_{0mi} + \frac{\Delta l_{pm}}{2} \cdot \cos\gamma_{mi} - X_{Цj} + X_{Цm} - X_{0jk}\right) \cdot \cos\gamma_{jk};$$
$$Y = \left[\left(Y_{0mi} + \frac{\Delta l_{pm}}{2} \cdot \sin\gamma_{mi} - Y_{Цj} + Y_{Цm}\right) \cdot \cos\lambda_j - \left(Z_{Цm} - Z_{Цj}\right) \cdot \sin\lambda_j - Y_{0jk}\right] \cos\gamma_{jk} -$$
$$- \left(X_{0mi} + \frac{\Delta l_{pm}}{2} \cdot \cos\gamma_{mi} - X_{Цj} + X_{Цm} - X_{0jk}\right) \cdot \sin\gamma_{jk};$$
$$Z = \left(Y_{0mi} + \frac{\Delta l_{pm}}{2} \cdot \sin\gamma_{mi} - Y_{Цj} + Y_{Цm}\right) \cdot \sin\lambda_j + \left(Z_{Цm} - Z_{Цj}\right) \cdot \cos\lambda_j. \quad (2)$$

де $X_Ц$, $Y_Ц$ і $Z_Ц$ з відповідними індексами - координати центрів систем $X_{0m}Y_{0m}Z_{0m}$ кожної ділянки різального леза в деякій абсолютній системі координат інструмента. Як таку систему можна взяти систему координат будь-якої ділянки, наприклад, першої.

В залежності від розміщення теплового джерела і точки, де розраховується температура, параметр *T* (1) та одержані загальні вирази (2) перетворюються в часткові для конкретних випадків за допомогою наступних підстановок [7]:

а) якщо $k = 1...N_1; i = 1...N_1$ (точки, де визначається температура, і джерела знаходяться на передній поверхні, функція T_{1mijk}), то підставляється тільки $\Delta l_{pm} = \Delta l_{1m}$;

б) якщо $k = (N_1 + 1)...2N_1; i = 1...N_1$ (точки, де визначається температура, знаходяться на передній поверхі, а джерела – на задній, функція T_{2mijk}), то підставляється $\Delta l_{pm} = \Delta l_{1m}$; $\lambda_j = 0; \gamma_{jk} = 90°$ і приймається Y=-Y;

в) якщо $k = 1...N_1; i = (N_1 + 1)...2N_1$ (точки, де визначається температура, знаходяться на задній поверхні, а джерела – на передній, функція T'_{1mijk}), то підставляється $\Delta l_{pm} = \Delta l_{2m}$; $\gamma_{mi} = 90°$.

г) якщо $k = (N_1 + 1)...2N_1; i = (N_1 + 1)...2N_1$ (точки, де визначається температура, і джерела знаходяться на задній поверхні, функція T'_{2mijk}), то підставляється $\Delta l_{pm} = \Delta l_{2m}$; $\lambda_j = 0$; $\gamma_{mi} = \gamma_{jk} = 90°$.

Проведемо ці викладки для випадку круглої різальної пластинки діаметром d із позитивним заднім кутом (див. рис.1). Вона розміщається у корпусі різця під кутом λ=0, тобто площина кругової різальної кромки перпендикулярна напрямку швидкості різання. Оброблення проводиться з глибиною t і поздовжньою подачею S. Вся активна довжина різальної кромки АО розбивається на $K_д$ ділянок, що представляють собою прямокутні джерела тепловиділення розмірами: на передній поверхні $2\Delta b \times l_1$ і на задній - $2\Delta b \times l_2$. Задача полягає у визначенні координат центрів елементарних джерел $X_{цj}$ і $Z_{цj}$ в абсолютній системі координат $X_цOZ_ц$, пов'язаною із пластинкою, а також товщини зрізуваного шару в напрямку сходження стружки.

Центральний кут θ_0 активної довжини кругової різальної кромки дорівнює:

$$\theta_0 = \arccos(1 - 2t / d).$$

Ввівши $K_д$ ділянок різальної кромки, одержуємо центральний кут кожної ділянки:

$$\Delta\theta_0 = \theta_0 / K_д \text{ і її ширину } 2 \cdot \Delta b = \Delta\theta_0 \cdot d / 2.$$

Для кожної j-ї системи координат ділянки різальної кромки $\left(j = 1...K_д\right)$ визначається центральний кут центру цієї системи:

$$\theta_j = \theta_0 - \Delta\theta_0 (j - 0,5),$$

і його координати в системі $X_{цj}OZ_{цj}$:

$$X_{цj} = \frac{d}{2}(1 - \cos\theta_j);$$

$$Z_{цj} = \frac{d}{2}\sin\theta_j.$$

Центр цієї системи знаходиться на мінімальному діаметрі заготовки в точці О, а діаметр заготовки d_j в j-й точці дорівнює:

$$d_j = d_0 + 2x_{цj},$$

де d_0 - діаметр заготовки в точці О.

Товщина зрізуваного шару a_{cj} в напрямку сходження стружки визначається із нескладних геометричних побудов:

$$a_{cj} = S \cdot \sin\theta_j \Big/ \cos\left(\theta_j - \frac{\theta_0}{2}\right).$$

Висновки

В роботі представлена загальна методика розрахунку відносних координат точки, де розраховується температура на контактній поверхні інструмента, і елементарних теплових джерел, що діють на передній чи задній поверхні різального леза. Приймається, що температура у будь-якій точці є сумою температур, які

створюються в цій точці кожним із елементарних джерел. Особливості розрахунку для конкретної форми різальної кромки полягає у визначенні координат центра кожного джерела. В роботі показані особливості застосування загальної методики для круглих різальних пластинок.

Література

1. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І.Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ–2000, 2018. – 471 с.
2. Криворучко Д. В. Основы прогнозирующего моделирования процессов резания методом конечных элементов: Дис. … док. техн. наук : 05.03.01 . – Харьков, 2010. – 448 с.
3. Oxley P. Development and application of a predictive machining theory// Annals of the CIRP. - 1998. - Vol. 47/1.- P.- 11/KP-11/KP-19.
4. Клушин М.И. Алгоритмы расчета сил и скоростей резания //Труды Проектно-технологического и научно-исследовательского института. - Горький: ВВСНХ, 1963.-Вып.2. - С.121-152.
5. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов. - М.: Машиностроение, 1979. -152 с.
6. Петрухин С.С., Мазур Н.П. Применение метода ортогонального проектирования для определения профиля детали при обработке дисковым инструментом// Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием. - Тула: ТПИ, 1980. - С. 5-10.
7. Мазур Н.П. Разработка теоретических основ и практическое использование термомеханической модели обработки пластических материалов: дис.докт.техн.наук : 05.03.01 : защищена 22.11.1999 : утв. 9.02.2000. К., 1999. 309 с.

References

1. Mazur M.P. Osnovy teoriji rizannja materialiv : pidruchnyk [dlja vyshh. navch. zakladiv] / M.P. Mazur, Ju.M. Vnukov, A.I.Ghrabchenko, V.L. Dobroskok, V.O. Zalogha, Ju.K. Novosjolov, F.Ja. Jakubov ; pid zagh. red. M.P. Mazura. – 3-e vyd. pererob. i dop. – Ljviv : Novyj svit–2000, 2018. – 471 s.
2. Kryvoruchko D. V. Osnovы proghnozyrujushhegho modelyrovanyja processov rezanyja metodom konechnыkh эlementov: Dys. … dok. tekhn. nauk : 05.03.01 . – Kharjkov, 2010. – 448 s.
3. Oxley P. Development and application of a predictive machining theory// Annals of the CIRP. - 1998. - Vol. 47/1.- P.- 11/KP-11/KP-19.
4. Klushyn M.Y. Alghorytmы rascheta syl y skorostej rezanyja //Trudы Proektno-tekhnologhycheskogho y nauchno-yssledovateljskogho ynstytuta. - Ghorjkyj: VVSNKh, 1963.-Vыp.2. - S.121-152.
5. Sylyn S.S. Metod podobyja pry rezanyy metallov. - M.: Mashynostroenye, 1979. -152 s.
6. Petrukhyn S.S., Mazur N.P. Prymenenye metoda ortoghonaljnogho proektyrovanyja dlja opredelenyja profylja detaly pry obrabotke dyskovыm ynstrumentom// Yssledovanyja v oblasty ynstrumentaljnogho proyzvodstva y obrabotky metallov rezanyem. - Tula: TPY, 1980. - S. 5-10.
7. Mazur N.P. Razrabotka teoretycheskykh osnov y praktycheskoe yspoljzovanye termomekhanycheskoj modely obrabotky plastycheskykh materyalov: dys.dokt.tekhn.nauk : 05.03.01 : zashhyshhena 22.11.1999 : utv. 9.02.2000. K., 1999. 309 s.

Надійшла / Paper received : 11.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-67-72
УДК 628.9+692

Ю.С. СОКОЛАН, К.А. ПАРШЕНКО
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ЗМІН У НОРМУВАННІ ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ У ВІДПОВІДНОСТІ ІЗ ДЕРЖАВНИМИ БУДІВЕЛЬНИМИ НОРМАМИ

У роботі проведено аналіз нового методу розрахунку площі світлових прорізів в приміщеннях виробничого та невиробничого характеру. Крім того, проведено детальний аналіз відмінностей у нормування природного освітлення приміщень у відповідності із нововведеними нормами за ДБН В.2.5:28-2018 Природне і штучне освітлення, які діють з 01.03.2020 року.

Наведено формули розрахунку площі світлопрорізів на стадії ескізного проектування для систем верхнього та бокового освітлення у відповідності із ДБН В.2.5 – 28 – 2006 та ДБН В.2.5:28-2018. Виокремлено відмінності складових коефіцієнтів для зазначеного розрахунку, до яких відносяться: загальний коефіцієнт світлопропускання матеріалу, коефіцієнт світлопропускання матеріалу, коефіцієнт, що враховує втрати світла в рамах світлопрорізу, коефіцієнт, що враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях, коефіцієнт світлового клімату та нормований коефіцієнт природного освітлення.

В результаті проведеного аналізу встановлено переваги нової методики розрахунку площі світлових прорізів для систем верхнього та бокового освітлення. Серед основних переваг слід відзначити введення коефіцієнту для металопластикових рам світлових прорізів, оскільки відслідковується тенденція до щорічного збільшення відсотку використання вікон, виготовлених із металопластикових рам. Також встановлено, що зміни у зв'язку із введенням нової методики розрахунку площі світлових прорізів характерні одночасно як для бокового, так і верхнього природного освітлення.

Проведений аналіз дає можливість зробити висновок, що нововведена методика регламентування розрахунку площі світлових прорізів при природному освітленні забезпечує більшу точність, оскільки враховує більшу кількість факторів, які можуть вплинути на зміну освітленості, яка утворюється природнім світлом.

Ключові слова: природне освітлення, бокове освітлення, верхнє освітлення, державні будівельні норми, коефіцієнт природного освітлення, розрахунок площі світлопрорізів.

IULIIA SERGIIVNA SOKOLAN, KOSTIANTYN ANATOLIIOVYCH PARSHENKO
Khmelnytskyi National University

ANALYSIS OF CHANGES IN REGULATION OF NATURAL ILLUMINATION IN ACCORDANCE WITH STATE CONSTRUCTION REGULATIONS

Analysis of new calculation method of light opening area in premises of manufacturing and nonproduction character was realized in the article. Furthermore, the detailed analysis of differences in natural illumination regulation in accordance with newly-introduced regulation ДБН В.2.5:28-2018 Natural and artificial illumination, functioning from 01.03.2019 was made.

Calculation formulas for light opening area at the stage of initial design for overhead and side illumination systems in accordance with ДБН В.2.5 – 28 – 2006 and ДБН В.2.5:28-2018 were presented. Differences in component coefficients for indicated calculation were emphasized, videlicet: overall coefficient of light transmittance of the material, coefficient of light transmittance of the material, coefficient, considering light losses in frame of light opening, coefficient, considering light losses in sun-protective devices, light climate coefficient and standardized coefficient of natural illumination.

As a result of conducted analysis advantages of new method in light opening area calculation for overhead and side illumination systems were established. Among main advantages it's worth noting that the introduction of coefficient for reinforced-plastic light opening frames was made, inasmuch as overseen trend in annual increasing of windows, made of reinforced-plastic frames. It was also established that changes in connection with introduction of new calculation method of light opening area under conditions of natural illumination are simultaneously typical for side and overhead natural illumination.

Carried out analysis provides a possibility of drawing the conclusion that newly-introduced method of regulation of light opening area calculation under conditions of natural illumination provides higher accuracy, forasmuch as takes into account more factors, effecting on the change of illumination, created by natural light.

Keywords: natural illumination, side illumination, overhead illumination, State Construction Regulations, natural illumination coefficient, calculation of light opening area.

Постановка проблеми

Оскільки близько 90% інформації сприймається людиною через зоровий канал, освітлення відіграє важливу роль у виробничій діяльності, а також правильно запроектоване раціональне освітлення має важливе значення для виконання будь-яких видів робіт. Недостатня освітленість або її надмірна кількість знижують рівень збудженості центральної нервової системи і активність всіх життєвих процесів.

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль і для попередження виробничого травматизму. Велика кількість нещасних випадків на виробництві відбувається через недостатній рівень освітлення. Сонячне випромінювання зігріває та знезаражує повітря, очищує його від збудників багатьох хвороб. Окрім того, природне світло має і психологічну дію, створюючи у приміщенні для працівників відчуття безпосереднього зв'язку з довкіллям.

Враховуючи важливість впливу природного освітлення на виробничі процеси людини, існували наступні нормативні документи, які регламентували нормовані значення та методики розрахунку природного освітлення в приміщеннях:

1. СНиП II-4-79. Естественное и искуственное освещение. Даний документ діяв з 1979 року та був розроблений ще у Радянському Союзі [1].

2. ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення. На заміну СНиП II-4-79 на території України з 01.10.2006 почав діяти даний ДБН [2].

3. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. У 2018 році була розроблена нова методика розрахунку природного освітлення виробничих приміщень, встановлені нові норми та відредаговані недоліки попередньої версії 2006 року. Чинний від 01.03.2019 р [3].

Таким чином, актуальною є задача аналізу відмінностей у нормуванні природного освітлення приміщень у відповідності із нововведеним ДБН В.2.5:28 – 2018 Природне і штучне освітлення.

Виклад основного матеріалу

Проектування природного освітлення у новозбудованих будинках виконується згідно з існуючими нормами проектування. Природне освітлення необхідно передбачити для приміщень із постійним перебуванням у них людей. Діючі норми [3] розрізняють бічне, верхнє і комбіноване природне освітлення. При цьому верхнє та комбіноване освітлення виробничих і громадських будинків дозволяється проектувати лише у випадку, коли це необхідно за технологічним процесом виробництва зі спеціальним обґрунтуванням такого рішення, а також у тих виробничих приміщеннях, де не передбачається перебування людей більше від 50% робочого часу [4]. Тому розгляд відмінностей у нормуванні природного освітлення слід розпочати із бокового освітлення.

Бокове освітлення. На стадії ескізного проектування значення необхідної площі світлопрорізів при боковому освітленні приміщень у відповідності із ДБН В.2.5:28-2018 розраховується за формулою (1) [3], в той час як до 01.03.2019 за ДБН В.2.5 – 28 – 2006 розраховувався за формулою (3) [2].

$$S_{\text{в}} = \frac{D_{\text{н}}}{100m} \cdot \frac{\text{К}_{\text{з}} \eta_{\text{в}} \text{К}_{\text{буд}}}{\tau_0 r_1} \cdot S_{\text{п}}, \tag{1}$$

де $S_{\text{в}}$ – площа світлових прорізів, м^2;

$S_{\text{п}}$ – площа підлоги приміщення, м^2;

$D_{\text{н}}$ – нормоване значення коефіцієнту природного освітлення (КПО), %;

m – коефіцієнт світлового клімату світлопрорізу, який визначається за таблицею 1 та рисунком 1;

$\text{К}_{\text{з}}$ – коефіцієнт запасу;

$\eta_{\text{в}}$ – коефіцієнт, який враховує світлову активність вікон;

$\text{К}_{\text{буд}}$ – коефіцієнт, який враховує затінювання вікон протилежними будинками;

r_1 – коефіцієнт, який враховує підвищення КПО за рахунок світла, відбитого від внутрішніх поверхонь приміщення;

τ_0 – загальний коефіцієнт світлопропускання матеріалу, який визначається за формулою:

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5, \tag{2}$$

де τ_1 – коефіцієнт світлопропускання матеріалу;

τ_2 – коефіцієнт, що враховує втрати світла в рамах світлопрорізу;

τ_3 – коефіцієнт, який враховує втрати світла у несучих конструкціях (при боковому освітленні $\tau_3 = 1$);

τ_4 – коефіцієнт, який враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях (при відсутності сонцезахисних пристрої $\tau_4 = 1$);

τ_5 – коефіцієнт, який враховує втрати світла у сонцезахисній сітці (за її наявності τ_5 = 0,9, при відсутності – τ_5 = 1,0) [3].

$$100\frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{п}}} = \frac{e_N \text{К}_{\text{з}} \eta_{\text{в}}}{\tau_0 r_1} \text{К}_{\text{буд}} \tag{3}$$

де $S_{\text{в}}$, $S_{\text{п}}$, $\text{К}_{\text{з}}$, $\eta_{\text{в}}$, $\text{К}_{\text{буд}}$, r_1, τ_0 – те ж саме, що і в формулі (1);

e_N – нормоване значення КПО за ДБН В.2.5 – 28 – 2006 [2], який визначався за формулою (4):

$$e_N = e_n \cdot m_N, \tag{4}$$

де e_N – значення КПО за таблицями;
m_N – коефіцієнт світлового клімату;
N – номер групи забезпеченості природним світлом.

Рис. 1. Карта світлокліматичного районування території України за ДБН В.2.5:28-2018

Як видно з формул (1) та (3), для нормованого КПО змінилось навіть позначення – замість e_N позначається $D_н$.

Нормоване значення КПО $D_н$ визначається в залежності від типу та призначення приміщення, які наведені у таблицях 5.1, 5.2 чи додатках Д, Ж [3]. Приміщення поділені на цивільні, громадські, комунальні та виробничі. При виборі $D_н$ є можливість обрати 2 варіанти розрахунку:

- за мінімальним значенням нормованого КПО;

- за середнім значенням нормованого КПО.Основною відмінністю є те, що нормоване значення КПО з 2006 по 2018 рік визначалося в залежності від світлового клімату, в якому знаходиться приміщення, а станом на 2019 світлокліматичний пояс району, в якому знаходиться приміщення не впливає на значення КПО [2].

При виборі коефіцієнту світлового клімату в першу чергу необхідно визначити світлокліматичний район приміщення, для якого проводиться розрахунок. Він обирається на основі рис. 1. Всього територія України поділена на 4 світлокліматичні райони:

I район – Львівська, Рівненська, Житомирська, Хмельницька, Тернопільська, Івано-Франківська, Волинська області;

II район – Закарпатська, Чернівецька, Вінницька, Київська, Черкаська, Чернігівська, Сумська, Полтавська, Харківська області;

III район – Кіровоградська, Дніпропетровська, Донецька, Луганська області;

IV район – Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька області та Автономна Республіка Крим.

Після вибору свтлокліматичного району, для вибору коефіцієнту світлового клімату необхідно визначити орієнтацію світлових прорізів відносно сторін світу (азимут). Вибір коефіцієнту світлового клімату відбувається за таблицею 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнту світлового клімату *m* [3]

Світлокліматичний район	Значення m для вертикальних світлопрорізів, орієнтованих за азимутом								
	Вертикальних, орієнтованих на:								Орієнтованих на зеніт
	Пн	ПнС	С	ПдС	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ	
I	1,93	0,96	1,00	1,02	1,03	1,02	1,01	0,96	0,99
II	1,05	1,09	1,14	1,16	1,18	1,17	1,15	1,09	1,12
III	1,07	1,12	1,18	1,22	1,23	1,22	1,20	1,12	1,17
IV	1,15	1,21	1,28	1,32	1,33	1,32	1,29	1,21	1,26

Орієнтація світлопрорізів визначається за азимутом А – кутом в плані між напрямом на північ та вектором, спрямованим зсередини приміщення назовні, перпендикулярно до площини світлопрорізу. Азимут відраховується від напряму на північ за годинниковою стрілкою:

Пн – північна, 0 < А ≤ 22,5˚, 337,5 < А ≤ 360˚;

ПнС – північно-східна, 22,5 < А ≤ 67,5˚;

С – східна, 67,5 < А ≤ 112,5˚;

ПдС – південно-східна, 112,5 < А ≤ 157,5˚;

Пд – південна, 157,5 < А ≤ 202,5˚;

ПдЗ – південно-західна, 202,5 < А ≤ 247,5˚;

З – західна, 247,5 < А ≤ 292,5˚;

ПнЗ – північно-західна, 292,5 < А ≤ 337,5˚ [3].

При порівнянні вибору коефіцієнту світлового клімату *m* за нормами 2006 (табл. 2) та 2019 року (табл. 1), можна зробити висновок, що станом на 2019 коефіцієнт світлового клімату набув більшої точності, оскільки територія України розбита на IV світлокліматичні райони, кожному з яких притаманний свій коефіцієнт світлового клімату.

Принципових змін зазнали складові коефіцієнті для розрахунку загального коефіцієнту світлопропускання. Формула для розрахунку залишилась незмінною (2), але були змінені значення наступних коефіцієнтів:

- коефіцієнт світлопропускання матеріалу τ_1 (табл. 3 [3] та табл. 4 [2]);
- коефіцієнт, що враховує втрати світла в рамах світлопрорізу τ_2;
- коефіцієнт, який враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях τ_4.

Таблиця 2

Значення коефіцієнту світлового клімату у відповідності з ДБН В.2.5-28-2006 [2]

Світлові прорізи	Орієнтація світлових прорізів за сторонами горизонту	Коефіцієнт світлового клімату, m	
		Автономна Республіка Крим, Одеська обл.	Решта території України
В зовнішніх стінах будинків	Північ	0,85	0,90
	Північ-Схід, Північ-Захід	0,85	0,90
	Захід, Схід	0,80	0,85
	Південь-Захід, Південь-Схід	0,80	0,85
	Південь	0,75	0,85

Таблиця 3

Значення коефіцієнта τ_1 [3]

Вид світлопрозорого матеріалу	Значення τ_1	Вид світлопрозорого матеріалу	Значення τ_1
Скло безкольорове завтовшки, мм 2,0	0,89	Склопрофіліт: швелерного перерізу	0,8
3,0	0,88	коробчастого перерізу	0,65
4,0	0,87	Скло спектрально-селективне	0,75
5,0	0,86	Органічне скло: прозоре	0,9
6,0	0,85		
8,0	0,83	молочне	0,6
10	0,81	Склоблоки: світлорозсіювальні	0,5
12	0,79		
15	0,76	світлопроникні	0,55
19	0,72	Скло листове армоване	0,6
25	0,67	Скло листове візерункове	0,65

Якщо порівняти значення таблиць 3 та 4, можна зробити висновок, що значення коефіцієнту світлопропускання матеріалу τ_1 у ДБН 2018 року стало більш широким. Наприклад, для безкольорового скла у новому ДБН наявні 11 значень коефіцієнту світлопропускання матеріалу в залежності від його товщини.

Таблиця 4

Значення коефіцієнту τ_1 у відповідності з ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення

Вид світлопропускаючого матеріалу	Значення τ1	Вид світлопропускаючого матеріалу	Значення τ1
Скло віконне листове: Одинарне Подвійне Потрійне	 0,9 0,8 0,75	Органічне скло Прозоре молочне	 0,9 0,6
Скло листове візерунчасте	0,65	Скло вітринне завтовшки 6-8 мм	0,8
Скло листове з спеціальними властивостями: Сонцезахисне Контрастне	 0,65 0,75	Порожнисті скляні блоки: Світлорозсіюючі Світлопрозорі	 0,5 0,55
Скло листове армоване	0,6	Склопакети	0,8

Одним із вагомих і основних недоліків ДБН 2006 року була відсутність коефіцієнту τ_2 для металопластикових рам вікон. Ще до 1997 року металопластикові конструкції займали невеликий сегмент у 3% від загального обсягу виробництва віконних систем [5]. На сьогоднішній день металопластикові вікна складають від 55 до 60% всіх вікон, що випускаються. Обсяги продажів постійно зростають, так само, як і кількість компаній, що їх виготовляє – в даний час в Україні представлено близько 60 виробників металопластикових профілів, хоча сумарна ринкова частка семи найбільших імпортерів складає близько 70%.

Сумарний обсяг продажів профілів за 2002 рік склав близько 15-17 тис. тон на суму приблизно 40-45 млн. доларів [5]. Тобто, на момент виходу ДБН В.2.5-2006 Природне і штучне освітлення, металопластикові рами для вікон вже набирали широкого застосування, але коефіцієнт, який би враховував втрати світла в рамах такого типу не був введений. Даний фактор став одним із найвагоміших недоліків при нормуванні природного освітлення приміщень, оскільки неможливо було точно врахувати всі фактори у випадку встановлення в будівлях металопластикових вікон.

У ДБН В.2.5 - 28:2018 Природне і штучне освітлення було виправлено недолік відсутності коефіцієнту для металопластикових віконних рам (табл. 5).

Таблиця 5

Значення коефіцієнту τ_2 [2]

Вид рами	Значення τ_2	Вид рами	Значення τ_2
Рами для вікон і ліхтарів промислових будівель:		Рами для вікон житлових, громадських та допоміжних будівель:	
а) дерев'яні:		а) дерев'яні:	
одинарні	0,75	одинарні	0,8
спарені	0,7	спарені	0,75
подвійні окремі	0,6	подвійні окремі	0,65
		з потрійним заскленням	0,5
б) сталеві:			
одинарні, які відкриваються	0,75	б) металеві:	0,9
одинарні глухі	0,9	одинарні	0,85
подвійні глухі	0,8	спарені	0,8
		подвійні окремі з потрійним заскленням	0,7

Крім того, було спрощено вибір коефіцієнту τ_2 для металевих та дерев'яних рам. За нововведеною методикою металопластикових, дерев'яних та сталевих рам даний коефіцієнт стандартний та становить, відповідно 0,75, 0,75 та 0,85.

Змін зазнали і значення коефіцієнту τ_4, який враховує втрати світла в сонцезахисних пристроях. За ДБН В.2.5-28-2006 він визначався за табл. 7, а за нововведеним ДБН – за табл. 6. Порівнявши таблиці 6 та 7 можна зробити висновок, що коефіцієнт τ_4, який враховує сонцезахисні пристрої, за новим ДБН дає можливість врахувати тип сонцезахисного пристрою більш точно та надає 13 значень коефіцієнту замість 4.

Таблиця 6

Значення коефіцієнту τ_4 [2]

Сонцезахисні пристрої, вироби і матеріали	Значення τ_4
Регулюючі жалюзі, що складаються, та штори (міжскляні, внутрішні, зовнішні)	1
Стаціонарні жалюзі та екрани із захисним кутом не більше 45° при розташуванні пластини жалюзі або екрану під кутом до 90° до площини вікна:	
Горизонтальні	0,65
Вертикальні	0,75
Горизонтальні козирки:	
Із захисним кутом не більше 30°	0,8
Із захисним кутом від 15° до 45° (багатоступінчаті)	0,9-0,6

Отже, провівши аналіз у точності розрахунку бокового природного освітлення у відповідності з ДБН В.2.5 – 28 – 2006 і ДБН В.2.5 – 28:2018 Природне і штучне освітлення можна зробити висновок, що розрахунок природного освітлення за нововведеним ДБН має більшу точність та враховує більшу кількість факторів, які можуть вплинути на зміну освітленості, яка утворюється природнім світлом.

Верхнє освітлення. При верхньому освітленні приміщень на стадії ескізного проектування у відповідності з ДБН В.2.5:28-2018 Природне і штучне освітлення наближене значення необхідної площі світлопрорізів розраховується за формулою (5) [3], в той час як за ДБН В.2.5-28-2006 розраховувалась за формулою (6) [2]:

$$S_л = \frac{D_п}{100m} \cdot \frac{К_з \eta_л}{\tau_0 r_2 К_л} \cdot S_п, \quad (5)$$

$$100\frac{S_Л}{S_п} = \frac{e_N К_з \eta_Л}{\tau_0 r_2 К_л} \quad (6)$$

де $S_л$ – площа світлових прорізів при верхньому освітленні, м^2;

$\eta_л$ – коефіцієнт, який враховує світлову активність вікон;

$K_л$ – коефіцієнт, який враховує тип ліхтаря;

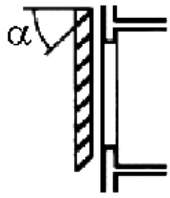
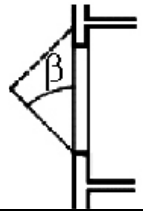
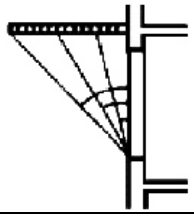
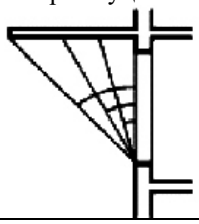
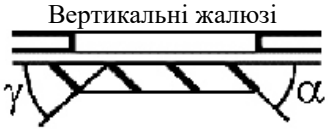
r_2 – коефіцієнт, який враховує підвищення КПО за рахунок світла, відбитого від внутрішніх поверхонь приміщення;

$D_п$, $К_з$, m, τ_0, $S_п$ – те ж саме, що у формулі (1);

e_N – те ж саме, що у формулі (3).

Таблиця 7

Значення коефіцієнту τ_4 [3]

Схема	Кут	Значення τ_4	Схема	Кут	Значення τ_4
Горизонтальні жалюзі 	α = 0°	0,75	Маркізи напівпрозорі 	β = 45°	0,4
	α = 45°	0,35			
Козирок решітчастий 	β = 45°	0,65	Козирок суцільний 	β = 45°	0,6
	β = 30°	0,82		β = 30°	0,8
	β = 15°	0,95		β = 15°	0,95
Вертикальні екрани	γ = 15°	0,95	Вертикальні жалюзі 	γ = 45°, α = 90°	0,7
	γ = 30°	0,85		γ = 45°, α = 45°	0,6

Провівши аналіз змін складових частин формул для розрахунку верхнього природного освітлення приміщень було встановлено, що значення та принцип визначення коефіцієнтів $\eta_л$, $K_л$, r_2, $К_з$ залишилось незмінним. Крім того було встановлено, що відмінності у розрахунку площі світлопрорізів для верхнього освітлення у відповідності із нововведеним ДБН стосуються тих самих коефіцієнтів, що і для бокового освітлення. Тобто, вищезазначені зміни стосуються як бокового, так і верхнього природного освітлення приміщень.

Висновки

Проведений аналіз дає можливість зробити висновок, що нововведена методика регламентування розрахунку площі світлових прорізів при природному освітленні забезпечує більшу точність, оскільки враховує більшу кількість факторів, які можуть вплинути на зміну освітленості, яка утворюється природнім світлом. Крім того, у нововведеній методиці усунений вагомий недолік стосовно відсутності коефіцієнту матеріалу рами для металопластикових вікон, що робило неможливим розрахунок площі світлових прорізів при використанні таких рам.

Література

1. СНиП II – 4 – 79 Естественное и искусственное освещение. – Москва, Стройиздат. – 1980. – 50 с.
2. ДБН В.2.5 – 28 – 2006 Природне і штучне освітлення. – Київ, Мінрегіонбуд України. – 2006. – 142 с.
3. ДБН В.2.5:28 – 2018 Природне і штучне освітлення. – Київ, Мінрегіонбуд України. – 2018. – 137 с.
4. Скриль І.Н. Інсоляція житла / І.Н. Скриль. – К.: Будівельник, 1981. – 75 с.
5. Український ринок вікон та фасадів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://fasadinfo.ua/articles/market/79

References

1. SHiP II – 4 – 79 Natural and artificial illumination. – Moscow, Stroyizdat. – 1980. – 50 p.
2. DBN V.2.5 – 28 – 2006 Natural and artificial illumination. – Kyiv, Minregionbud of Ukraine. – 2006. – 142 p.
3. DBN V.2.5:28-2018 Natural and artificial illumination. – Kyiv, Minregionbud of Ukraine. – 2018. – 137 p.
4. Skryl I.N. Solar exposure of housing accommodations. / I. N. Skryl. – K.: Budivelnyk, 1981. – 75 p.
5. Ukrainian market of windows and frontispieces. [Electronic source]. – Available at: https://fasadinfo.ua/articles/market/79

Надійшла / Paper received : 08.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-73-78
УДК 621.01: 620.193.16

Н.О. КОСТЮК, А.І. ГОРДЄЄВ, О.А. ГОРДЄЄВ
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИВОДУ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ПОРШНЕВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

При створенні конструкцій різноманітних машин завжди ставиться завдання досягнення енергозбереження технологічного процесу та машини, що проектуються. Запропоновано вібраційну машину, яка застосовує низькочастотні вібрації для формування кавітаційних полів у рідинних субстанціях, що обробляються з метою зміни їх властивостей та знезаражування. Проведено дослідження розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини на процес знезаражування та зміни властивостей води і визначено витрати потужності приводу при зміні части коливань приводу. Запропонована конструкція вібраційної машини показала перспективність застосування запропонованого методу знезаражування і активації води при створенні вібраційних машин індивідуального користування.

Ключові слова: вібраційна машина, кавітація, знезаражування та властивості води.

N.O. KOSTIUK, A.I. HORDEEV O.A. HORDEEV
Khmelnytskyi National University

A GROUND OF PARAMETERS OF COMPENSATIVE RESILIENT SYSTEM OF OSCILLATION MACHINE IS WITH ECCENTRIC PERSON OCCASION

The greatest technological interest is attracted by hydrodynamic cavitation devices, in which a local pressure drop is formed in the flow of the processed liquid and hydrodynamic cavitation develops due to a sharp change in the geometry of the fluid flow. Increasing the time of periodic action of cavitation on a liquid medium gives a vibrational change in pressure in the pulsation chamber, which forms the generation of shock waves and leads to disinfection of water and intensification of its structural transformations. When creating designs of various machines, the task is always to achieve energy efficiency of the proposed process and machine. A machine that uses low-frequency vibrations to form cavitation fields in liquid substances that are treated to change their properties and disinfect is proposed. The vibrating machine uses a piston-type activator with an eccentric drive. In order to determine the energy consumption of a piston-type vibrating machine, studies of changes in the energy consumption of the drive when changing the oscillation frequency of the piston by changing the voltage on a DC motor with registration of the current consumed by the eccentric drive of the vibrating machine. Researches of distribution of power consumption of the drive of the vibrating car on process of disinfection and change of properties of water are carried out and expenses of power of the drive are defined. The created design of the vibrating machine showed the prospects of application of the proposed method of disinfection and activation of water in the creation of vibrating machines for individual use.

Keywords: vibrating machine, cavitation, disinfection and water properties.

Вступ

Вода є важливою складовою життєвого процесу. Вона грає роль не тільки хімічного розчинника, але є хранителем і переносником інформації, несе коди життєвих процесів, і в міру розвитку науки відкриваються все нові процеси впливу на людину і техніку через вплив на воду, через нові фізичні принципи і явища активації води і водних систем.

У розробку теоретичних основ і технології водної підготовки і очищення стічних вод вагомий внесок внесли Л.А. Кульській, І.М. Гороновській, О.М. Когановській, М.О. Шевченко, М.К. Ротмютров і багато інших відомих вчених. В останні роки вплив ефектів гідрокавітації на знезаражування та зміну властивостей водного середовища вивчали І.М. Федоткін, І.С. Гулий, А.І. Некоз, А.А. Литвиненко, П.М. Немирович, Т.М. Вітенько, Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, Р.І. Сілін і інші вчені [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Молекула води є активним диполем, де киснева сторона негативна, а воднева позитивна. В результаті молекули води притягуються своїми протилежними полюсами, і утворюють полярні зв'язки, на розрив яких потрібно витратити певну енергію. У складі кожної молекули іон водню (протон) не має внутрішніх електронних шарів і має малі розміри, в результаті чого він може проникати в електронну оболонку негативно поляризованого атома кисню сусідньої молекули, утворити водневий зв'язок з іншою молекулою, тобто вони є диполями води. Диполі є основною причиною утворення мікрокластерной структури води. Кавітаційне поле є одним з факторів який впливає на стан упорядкованості структури води та її знезаражування.

Найбільший технологічний інтерес привертають гідродинамічні кавітаційні пристрої, у яких в потоці рідини, що оброблюється, утворюється місцеве зниження тиску і за рахунок різкої зміни геометрії течії рідина розвивається гідродинамічна кавітація [1]. Енергія для виникнення кавітації підводиться безпосередньо технологічним потоком рідини (гідродинамічні пристрої статичного типу), або обертовим кавітатором (гідродинамічні пристрої динамічного типу) [2].

Кавітація у рідини виникає на одиничному зародку. Потім за час, в кілька десятків періодів коливань, мікробульбашки розвиваються в стабільну область, яка складається з безлічі кавітаційних бульбашок. Процес розвитку кавітаційної області представляється у такий спосіб. При сплескуванні кавітаційна бульбашка може втрачати стійкість і розпадатися на частини, а при тому, що тиск і температура

в цей момент в бульбашці максимальні, то тиск і температура газової суміші, що «утворилися в осколках» теж підвищені. У фазі розтягування вони легко розширюються і стають новими зародками кавітації, менш міцними, ніж постійно наявні в рідині. Кавітаційні порожнини, що виникли на цих зародках, породжують нові. Усередині кавітаційної області йде безперервний процес розмноження і коагуляції кавітаційних бульбашок, причому кавітаційний поріг трохи зменшується, тому, що в сталому режимі роль кавітаційних зародків починають виконувати рівноважні бульбашки, обсяг і газовміст в яких більше ніж у зародків.

Використання вібраційних коливань в технологіях з рідким середовищем обумовлено поліпшенням якісних показників, а в деяких випадках єдиною можливістю реалізації технологічних процесів. Зазвичай, кавітаційний вплив використовується як один з етапів знезаражування та очищення водного середовища.

З проведених досліджень по знезаражуванню та зміні властивостей води і її структурного стану з використанням різних методів активації [4], було встановлено, що на знезаражування води і її структуризацію призводить вплив наступних кавітаційних факторів: періодичність та тривалість зміни величини тиску, поява термобаричних ефектів, зміна величини електростатичного поля на поверхні бульбашок, зміна коефіцієнта поверхневого натягу, проходження хімічних реакцій за участю активних газів з утворенням нових сполук. З досліджень [4] встановлено, що отриманий стан активованої води зберігається до трьох діб, після чого відбувається стабілізація показників: pH, ORP, але на рівні значно більшому для pH і меншим для ORP, ніж вихідний рівень. Це дозволяє стверджувати про поліпшення властивостей води. Зменшується показник загальної концентрації вмісту розчинених солей від 400 до 300 одиниць, що говорить також про поліпшення якості води. Основною ідеєю створення ефективного режиму роботи вібраційних машин є створення режиму генерації кавітаційних бульбашок, при якому вони зароджуються в масовій кількості завдяки зворотно-поступальному проходженню рідини крізь отвори з гострими крайками. Описані ефекти отримані на запропонованих вібраційних машинах [5,6]. Необхідність збільшення часу періодичної дії кавітації на рідинне середовище дозволяє використання вібраційної зміни тиску у камері пульсації, що утворює генерацію ударних хвиль та призводить до знезаражування води і інтенсифікацію її структурних перетворень. Створення класу енергоощадних малогабаритних вібраційних гідрокавітаційних машин для індивідуального використання з метою безреагентного знезаражування води та зміни її властивостей води є актуальним завданням.

Виклад основного матеріалу

При створенні конструкцій різноманітних машин завжди ставиться завдання досягнення енергозбереження технологічного процесу та машин, що проектуються. З метою визначення енерговитрат вібраційної машини поршневого типу [5] (рис.1 та рис.2) було проведено дослідження енерговитрат приводу при зміні частоти коливань поршня за допомогою варіації величини напруги на електродвигуні постійного струму з реєстрацією величини сили струму, що споживає ексцентриковий привод вібраційної машини для проведення технологічного процесу.

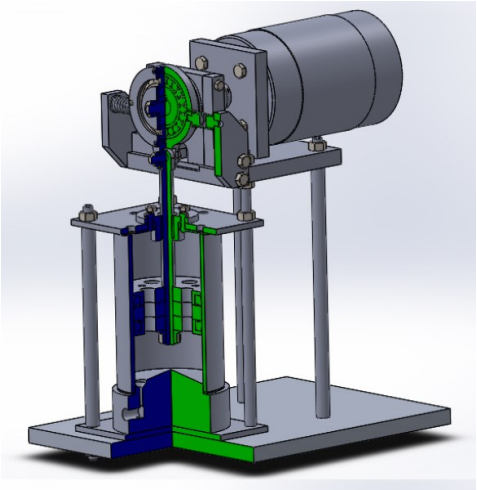


Рис.1 – Просторова 3D-модель вібраційної машини поршневого типу

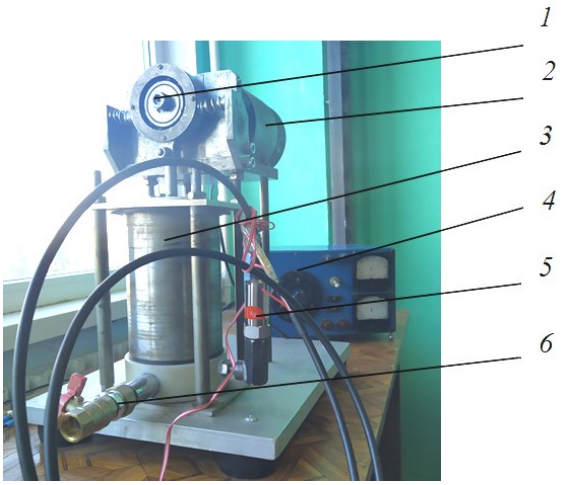


Рис.2 – загальний вигляд дослідної вібраційної машини: *1* – ексцентриковий вузол; *2* – електродвигун; *3* – камера пульсації; *4* – прилад керування частотою коливань; *5* – датчик тиску; *6* – кран для зливу води

Прилад керування частотою коливань 4 оснащено амперметром та вольтметром постійного струму, що дозволяло при зміні напруги постійного струму змінювати частоту коливань поршня та контролювати зміну величини сили струму, який споживає електродвигун постійного струму 2. З графіка (рис.3) встановлено, що сила струму зростає при збільшенні частоти коливань приводу при коливанні поршня на повітрі та при збільшені частоти від 15 Гц і далі сила струму стає стала. Ця енергія витрачається на сили тертя у машині, інерційні сили та сили пружної системи.

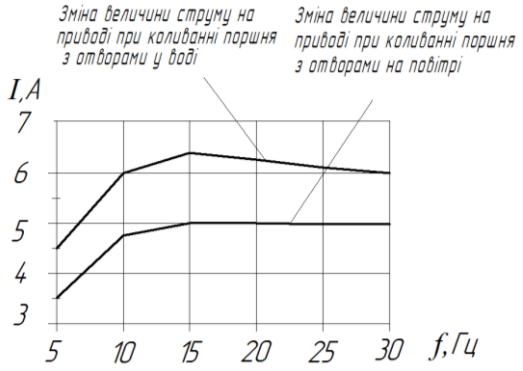


Рис.3 – Графікі залежності зміни сили струму привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня в різних середовищах

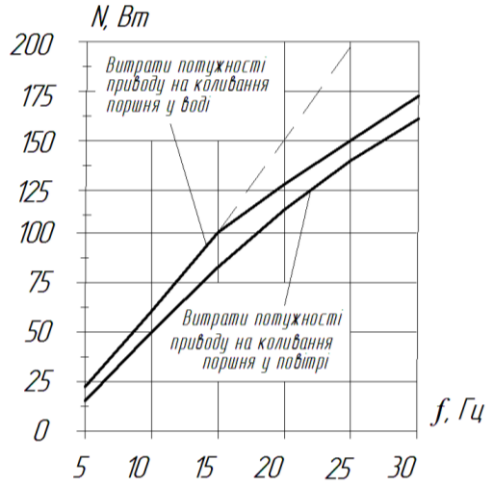


Рис.4 – Графікі залежності витрат потужності привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня в різних середовищах

Також з графіка (рис.3) встановлено, що сила струму зростає при збільшенні частоти коливань приводу та більше на 1,5А при коливанні поршня у воді чим на повітрі. Відповідно до попередніх енерговитрат додаються витрати на генерацію ударних хвиль та кавітаційний процес у отворах в поршні, але починаючи з частоти 15 Гц сила струму знижується з 6,5 до 6 А, що говорить про утворення в камері пульсації 3 значної кількості бульбашок великих розмірів (виникає додатковий пружний елемент), що знижує виток (проходження) рідини крізь отвори у поршні та знижує швидкість перемішування води в камері пульсації – відповідно знижується продуктивність кавітаційної дії.

На основі отриманих вимірювань, побудовано графік витрат потужності приводу робочого органа вібраційної машини, представлений на рис.4. З якого встановлено, що потужність приводу на проведення коливань поршня у воді також має нелінійний характер (відхилення від штрихової лінії після частоти 15Гц).

Результатом аналізу фізичних та фізико-механічних явищ, що протікають в процесі кавітаційної обробки води, стало рівняння балансу енерговитрат на роботу приводу вібраційної машин поршневого типу.

Загальні енерговитрати на виконану роботу $A_{заг.витр}$ можна представити як суму наступних видів робіт:

$$A_{заг.витр} = A_{мех.витр.} + A_{нагрів.} + A_{кавіт.\,реакції}\,, \tag{1}$$

де $A_{мех.витр.}$ – робота, яка витрачається на інерційні сили та тертя в обладнанні;

$A_{нагрів.}$ – робота на нагрівання води та елементів обладнання (без урахування дисипації тепла в повітря);

$A_{кавіт.\,реакції}$ – робота, що необхідна для протікання кавітаційних реакцій.

При проведенні дослідів по обробленні води при амплітуді коливань 0,002 м було визначено загальну роботу, що виконав привод обладнання на різних частотах коливань за період t = 15 хв. Розрахунок величини роботи на загальні витрати приводу проводився за формулою:

$$A_{заг.витр} = U \cdot I \cdot t\,, \tag{2}$$

де U – напруга в мережі живлення електродвигуна, *В*;
I – сила струму, що його споживає електродвигун приводу, *А* ,
t – тривалість часу обробки, *с*.

Результати розрахунків $A_{заг.витр.}$ представлені у табл.1.

Таблиця 1

Загальна робота приводу, витрачена на коливання поршня у воді

№	Параметр	Зміна параметрів та результат розрахунку					
1	*U*, (В)	5	10	15	20	25	30
2	*I*, (А)	4.5	6	6.4	6.2	6	5.9
3	$A_{заг.витр.}$, (Дж)	20250	54000	86400	111600	135000	159300

Механічні втрати при роботі обладнання на холостому ходу у повітрі були визначені експериментально та розраховані за залежністю (1) і представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Загальна робота приводу, витрачена на механічні витрати при коливання поршня у повітрі

№	Параметр	Зміна параметрів та результат розрахунку					
1	*U*, (В)	5	10	15	20	25	30
2	*I*, (А)	3.5	4.8	5	5	4.9	4.9
3	$A_{мех.витр.}$,(Дж)	15750	43200	67500	90000	110250	132300

Експериментально було встановлено, що частина роботи витрачається на розігрів рідини та елементів машини. Було визначено зміну температури нагрівання води та елементів обладнання при амплітуді 0,002 м та частоті коливань приводу 15 Гц (*U*=15В), яка склала – $\Delta t = 3^0$ С за період 15 хв. Нагрівалась вода $m_1 = 1{,}0$ кг, стальний корпус масою $m_2 = 1{,}6$ кг, пластмасовий поршень $m_3 = 0{,}3$кг. Робота, витрачена на нагрівання води та елементів машини, визначалася за формулою:

$$A_{нагрів.} = c_1 \cdot m_1(t_2 - t_1) + c_2 \cdot m_2(t_2 - t_1) + c_3 \cdot m_3(t_2 - t_1), = 11120\ Дж, \quad (3)$$

де $c_1 = 4190$ Дж/кг – теплоємність води;
$c_2 = 500$ Дж/кг – теплоємність заліза;
$c_3 = 1900$ Дж/кг – теплоємність пластмаси.
Робота приводу на виконання кавітаційних реакцій за період 15 хвилин визначалася за формулою:

$$A_{кавіт.реакції} = A_{заг.витр} - (A_{мех.витр.} + A_{нагрів.}) == 86400 - (67500 + 11120) = 7780\ Дж.$$

Проведемо аналіз процесів перетворення складу води, на які витрачається енергія при проходженні кавітаційних реакцій. Експериментальними дослідженнями [7] було визначено, що за той же період обробки (15 хв.) змінюється склад газового наповнення водного середовища. Отримані результати досліджень процесу кавітаційного впливу показали, що вплив гідрокавітації збільшує вміст азоту у бідістеляті води до 5 разів [8]. Після аналізу отриманих результатів, якщо врахувати те, що азот береться з повітря, а аміак розчиняється у воді, то від'ємне значення вільної енергії Гібса при змінному тиску можливе за умов від'ємної різниці кінцевих та початкових об'ємів реагуючих речовин та продуктів реакції, що дає можливість проведення реакції за даних умов:

$$\Delta V = V_k - V_n, \quad \Delta V \angle 0, \quad (4)$$

де ΔV – зміна об'ємів;
V_k – об'єм продуктів реакції;
V_n – об'єм речовин, що вступають у реакцію.
Тоді протікання кавітаційних реакції можливе при умовах, тобто:

$$\left(\frac{\partial_\Delta G}{\partial p}\right)_T = \Delta V, \quad \Delta V \angle 0, \quad (5)$$

де $_\Delta G$ – зміна вільної енергії Гібса;
p – тиск;
T – температура.
Ці умови підтверджується також розрахунками:

$$_\Delta G_{реакції} = {}_\Delta G_{Fe(OH)_2} + {}_\Delta G_{NH_3} - {}_\Delta G_{H_2O} - {}_\Delta G_{N_2} - {}_\Delta G_{Fe} =$$
$$= -115{,}57\frac{ккал}{моль} + 2\left(-3{,}976\frac{ккал}{моль}\right) - 2\left(-56{,}690\frac{ккал}{моль}\right) -$$
$$-3 \cdot 0\frac{ккал}{моль} - 3 \cdot 0\frac{ккал}{моль} = -10{,}1408\frac{ккал}{моль} = -42{,}38\frac{кДж}{моль}.$$

Отже, розрахунки показали, що $_\Delta G < 0$, звідси висновок – реакція можлива за даних умов.

Зменшення протягом кавітаційної обробки концентрації нітритів та збільшення концентрації нітратів можна пояснити поступовим окисненням нітритів (N^{3+}) до нітратів (N^{5+}) киснем повітря. Зростанням ступеня окиснення нітритів до нітратів можна пояснити збільшенням валентності атомарного азоту ($N^{3+} \rightarrow N^{5+}$) та наявністю органічних речовин, які містяться у воді. Отриманий ефект пояснюється тим, що при закритті кавітаційних бульбашок виникає зміна статичної електрики на поверхні бульбашки, значний тиск та температура. Усе це спричинює гемолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води та утворення радикальних частинок H^+ та іонів OH^- і O, що мають підвищену окиснювальну здатність. Хоча значна частина іонів H^+ і залишається у потоці рідини, вони характеризуються високою рухливістю і можуть швидко дифундувати з потоку. Іони OH^-, навпаки, накопичуються, що загалом призводить до зростання показника pH.

Отже, розрахована енергія, яка витрачається на виконання роботи кавітаційних реакцій, має достатню величину для проходження кавітаційних перетворень складу води.

Отриманий розподіл робіт, витрачених на різні процеси, дозволяє розрахувати коефіцієнт витрат енергії на кавітаційні реакції при роботі вібраційної машини за певний період (як приклад приведено його розрахунок за період 15 хвилин).

$$K_{кавіт.реакції} = \frac{A_{кавіт.реакц.}}{A_{заг.витр.}} = \frac{7780}{86400} = 0{,}1.$$

Висновки

У результаті аналізу експериментальних та аналітичних витрат енергії приводу вібраційної машини поршневого типу встановлено напрями розподілу витрат потужності приводу машини при зміні части коливань приводу за основними видами: механічні, нагрівання середовища та кавітаційні реакції.

Отримані залежності витрат потужності привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня показали, що енерговитрати на процес знезаражування та зміни властивостей потребують від 100 до 175 Вт, що говорить про енергощадність в порівнянні з іншими видами обладнання, призначеного для знезаражування.

Експериментальні та аналітичні дослідження підтвердили можливість проходження кавітаційних хімічних реакцій та зміни складу водного середовища при використанні вібраційної машини поршневого типу.

Отримані результати можуть бути враховані при розробленні технологій та конструкцій вібраційного обладнання для очищення стічних вод промислових, комунальних підприємств, тваринницьких комплексів тощо.

Література

1. Шевчук Л.І. Кавітація. Фізичні, хімічні, біологічні та технологічні аспекти: монографія / Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський. – Л.: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 376 с.

2.Вітенько, Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах [Текст]: монографія / Т. М. Вітенько. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 224 с.

3. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори: монографія / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2013. – 173 с.

4. Сілін Р.І. Властивості води та сучасні способи її очищення: монографія / Р.І. Сілін, Б.А. Баран, А.І. Гордєєв. – Хмельницький: ХНУ, 2009. – 254 с.

5. Пат. на корисну модель №126495 України. МПК C02F 1/00, Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ / А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк; – № u2018 10090; заяв. 02.01.2018; опубл. 25.08.2018, Бюл. №12.

6. Пат. на корисну модель № 140291 України, МПК C02F 9/00. Вібраційна машина для знезаражування води та її очистки / Гордєєв А.І., Ганзюк А.Л., Кравчук О.В., Кравчук В.В. Нездоровін В.П., Костюк Н.О. – u2019 08456; Заяв. 17.07.2019. Опубл. 10.02.2020, Бюл. №3.

7. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 386 с.

8. Кавітаційна обробка та її вплив на склад води / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, В. В. Третько, І. І. Сорока // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 3. – С. 253–257.

References

1. Shevchuk L.I., Starchevsky V.L,. Cavitation. Physical, chemical, biological and technological aspects: monograph. L .: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. 376 p.

2. Vitenko T.M. Hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes [Text]: monograph. Ternopil: TSTU named after I. Pulyuya, 2009. 224 p.

3. Shevchuk L.I., Aftanaziv I.S., Strogan O.I., Starchevsky V.L. Low-frequency vibration resonance cavitators: a monograph. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. 173 p.

4. Silin R.I., Baran B.A., Hordeev A.I. Properties of water and modern methods of its purification. Khmelnytskyi: KhNU, 2009. 254 p.

5. Pat. on the utility model №126495 of Ukraine. IPC C02F 1/00, Vibrating machine for disinfection of aquatic environments / A.I. Hordeev, N.O. Костюк; - № in 2018 10090; application. 02/01/2018; publ. 08/25/2018, Bull. №12.

6. Pat. on the utility model № 140291 of Ukraine, IPC C02F 9/00. Vibrating machine for water disinfection and purification / Hordeev A.I., Ganzyuk A.L., Kravchuk O.V., Kravchuk V.V., Nezdorovin V.P., Kostyuk N.O. - in 2019 08456; Application. 07/17/2019 Publ. 10.02.2020, Bull. №3.

7. Silin R.I., Hordeev A.I. Vibrating equipment based on a hydropulsator: a monograph. Khmelnytskyi: KhNU, 2007. 386 p.

8. Silin R.I., Hordeev A.I., Tretyko V.V., Soroka I.I. Cavitation treatment and its effect on water storage. Bulletin of the TUP. №3. 2002. 253-257 pp.

Надійшла / Paper received : 18.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-79-83
УДК 621.81

О.Г. ТИМОЩУК, С.П. ЛІСЕВИЧ
Хмельницький національний університет

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОГО РІВНЯ ДЕФОРМАЦІЇ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

На основі теорії стохастичних процесів розроблено метод ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень. Результатом є створення інженерного методу розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь поршневих металополімерних ущільненнь, а також оцінка точності розробленого методу для застосування в інженерній практиці проектування поршневих ущільненнь. В статті розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерної поверхні) з гладкою (металевою) поверхнею. Досліджено зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u на основі теорії стохастичних полів. Розрахований зв'язок ефективного рівня деформації з комплексом умов контактування і апроксимований на основі оригінальних програм Appr_E_1, Appr_E_2, Appr_E_3 [1]. Комплекс умов контактування (безрозмірна величина) К залежить від номінального напруження в контакті (σ_n), фізико-механічних властивостей матеріалів (зведеного модуля Юнга E та шорсткості контактуючих поверхонь (градієнта поверхні q). Виконано аналіз і оцінку точності розробленого методу розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень. Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою ефективного рівня деформації різняться не більше, ніж на 0,11 при К ≤ 0,7, 0,065 – при 0,7 < К ≤ 2 та не більше, ніж на 0,15 при 2 < К ≤ 5.

Ключові слова: теорія стохастичних полів; ефективний рівень деформації контактуючих поверхонь ; питома площа шорсткої поверхні контакту; герметичність циліндро-поршневих ущільнень; натікання газу; пружний контакт.

O.G. TYMOSHCHUK, S.P. LISEVYCH
Khmelnytsky National University

EVALUATION OF THE ACCURACY OF THE METHOD OF CALCULATING THE EFFECTIVE LEVEL OF DEFORMATION OF THE CONTACT SURFACES OF THE CYLINDER-PISTON SEALS

Based on the theory of stochastic processes, a method for the effective level of deformation of the contact surfaces of cylinder-piston seals has been developed. The result is the creation of an engineering method for calculating the effective level of deformation of the contact surfaces of the piston metal-polymer seals, as well as assessing the accuracy of the developed method for application in engineering practice of piston seals. The article considers the elastic contact of a strongly anisotropic rough surface (polymer surface) with a smooth (metal) surface.

In the process of contact loading there are two average planes of the rough surface - the average plane of the rough surface before deformation (the distance from the smooth surface to this average plane is called the deformation level h) and the average plane of the rough surface after deformation (the corresponding distance is called the effective deformation level u). The value of h characterizes the contact displacement of the surfaces and the normal contact stiffness of the joint. The value of u is important when calculating the flow of gas through the joint.

The relationship between the strain level h and the effective strain level u is investigated based on stochastic field theory. The connection of the effective level of deformation with a set of contact conditions is calculated and approximated on the basis of the original programs Appr_E_1, Appr_E_2, Appr_E_3 [1]. The set of contact conditions (dimensionless value) K depends on the nominal stress in the contact σ_n, physical and mechanical properties of materials (consolidated Young's modulus E and roughness of contact surfaces (surface gradient q)). Values calculated by the exact and approximate formula of the effective level of deformation differ by no more than 0.11 at K ≤ 0.7, 0.065 - at 0.7 < K ≤ 2 and no more than 0.15 at 2 < K ≤ 5.

Keywords: stochastic field theory; effective level of deformation of contact surfaces; specific area of the rough contact surface; tightness of cylinder-piston seals; gas leakage; elastic contact.

Формулювання цілі статті

Необхідно виконати аналіз і оцінку точності розробленого методу розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень.

Результати досліджень

В роботі розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металева поверхня).

З-за переформування матеріалу шорсткої поверхні в процесі контактного навантаження слід розрізняти дві середні площини шорсткої поверхні (рис.1) – середню площину шорсткої поверхні до деформування (відстань від гладкої поверхні до цієї середньої площини називається рівнем деформації h) і середню площину шорсткої поверхні після деформування (відповідна відстань називається ефективним рівнем деформації u). Величина h характеризує контактне зміщення поверхонь та нормальну контактну жорсткість стику. Величина

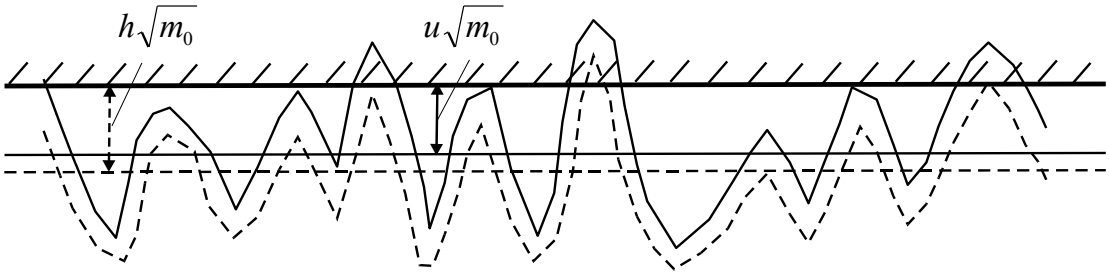


Рис. 1. Схема контактування спряжених поверхонь

u важлива при розрахунках натікання рідини чи газу через стик. Зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u описується рівнянням [1]:

$$\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{h^2}{2}\right)+h\left[3+\ \mathrm{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right)\right]+$$
$$+(2a-1)\left[\exp(h_g-h)\,\mathrm{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right)-\exp\left(h_g+\frac{1}{2}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right)\right] \quad (1)$$
$$=2\left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)+\mathrm{uerfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right],$$

де $a=2/erfc(h_g/\sqrt{2})$;

$h_g=-0{,}845$ – граничний рівень деформації (рівень деформації, при якому площа контакту рівна площі перерізу).

Об'єм простору, обмеженого шорсткою поверхнею і площиною, що перетинає поверхню на рівні u [2]:

$$V_S(u)=\frac{m_0^{1/2}}{2}\left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)+u\ \mathrm{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right]. \quad (2)$$

Було отримано формулу міжконтактного об'єму [1]:

$$V=\frac{m_0^{1/2}}{4}\left\{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}exp\left(-\frac{h^2}{2}\right)+h\left[3+\ erf\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right)\right]+\right.$$
$$\left.+(2a-1)\left[exp(h_g-h)\,erfc\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right)-exp\left(h_g+\frac{1}{2}\right)erfc\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right)\right]\right\}. \quad (3)$$

При нескінченно великих навантаженнях, коли $h\to h_g=-0{,}845$, міжконтактний об'єм V прямує до нуля. При малих навантаженнях, коли $h\to\infty$, маємо:

$$V\to hm_0^{1/2}, \quad (4)$$
$$m_0=\frac{\pi}{2}Ra^2,$$

де m_0 – спектральний момент нульового порядку.

При малих навантаженнях значення рівня деформації h і ефективного рівня деформації u рівні.

Зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u, розрахований на підставі рівняння (1), представлений на рис. 2. Розрахунки виконані за допомогою програми Niveau [1], написаної з вико-ристанням програмного продукту Mathcad Professional.

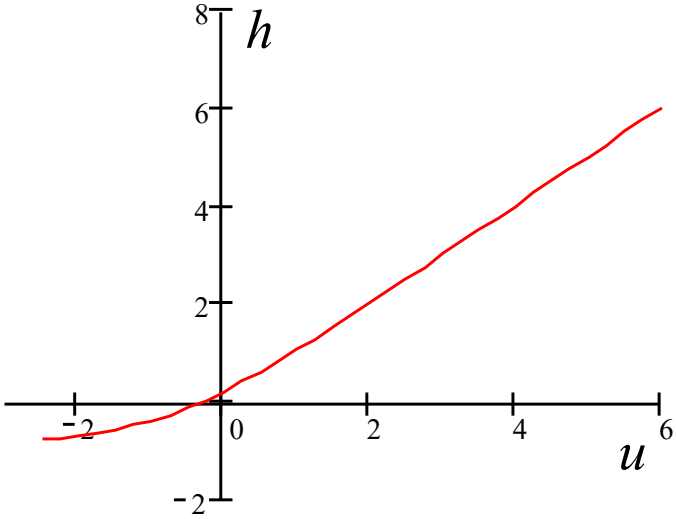


Рис. 2. Зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u

Опорна площа поверхні, що відповідає рівню u, може бути розрахована за формулою [3]:

$$\eta_c(u) = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) . \tag{5}$$

Зв'язок ефективного рівня деформації з комплексом умов контактування можна отримати наступним чином. Фактичну площу контакту η можна визначити як опорну площу шорсткої деформованої поверхні, що відповідає рівню u. Тоді, згідно з (5), маємо:

$$\eta = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) . \tag{6}$$

В той же час, в [4] отримано наступний зв'язок фактичної площі контакту з комплексом умов контактування:

$$\eta = 1 - exp(-K) . \tag{7}$$

Таким чином, отримано наступне рівняння для визначення ефективного рівня деформації за заданою величиною комплексу умов контактування:

$$1 - exp(-K) - \frac{1}{2} erfc\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0 , \tag{8}$$

$$K = \frac{1{,}83\sigma_n}{E\,q} .$$

На підставі (8) за допомогою програми Effectiv [1], написаної з використанням програмного продукту Mathcad Professional, розрахований зв'язок ефективного рівня деформації з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 3.

Залежність, представлена на рис. 3, була апроксимована формулою (9), яка отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_E_1, Appr_E_2, Appr_E_3 [1], написаними з використанням програмного продукту Mathcad Professional:

$$u = \begin{cases} -7{,}890 + 4{,}453\, ln(5{,}562 - C), & (K \le 0{,}7); \\ -2{,}089\, exp[-(0{,}620 + C)^{-1{,}302}], & (0{,}7 < K \le 2); \\ -4{,}522\, exp[-(-0{,}062 + C)^{-0{,}967}], & (2 < K \le 5) \end{cases} . \tag{9}$$

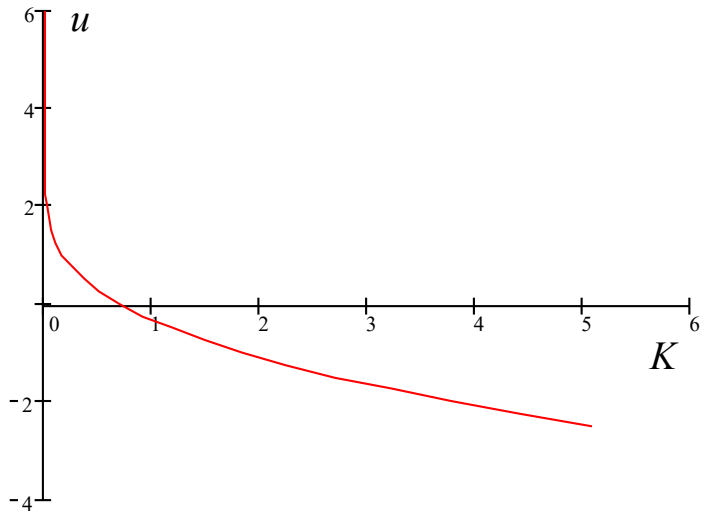
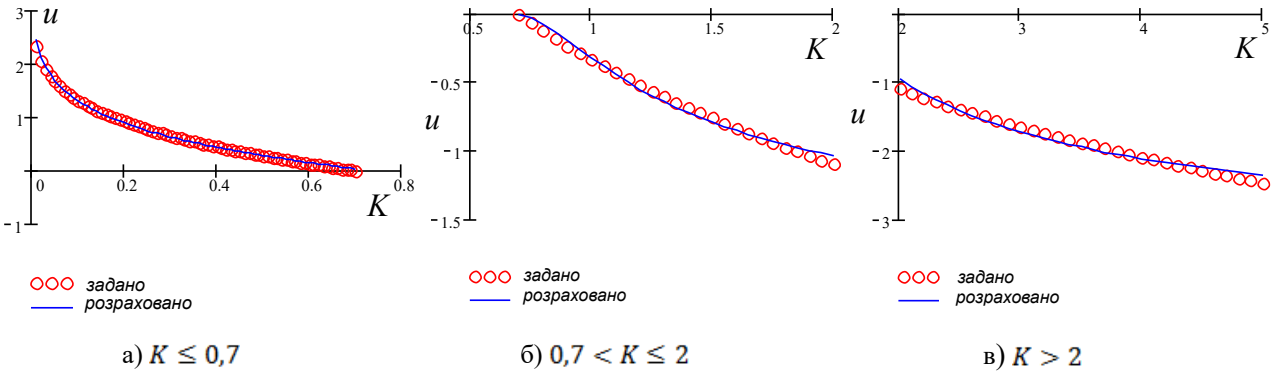


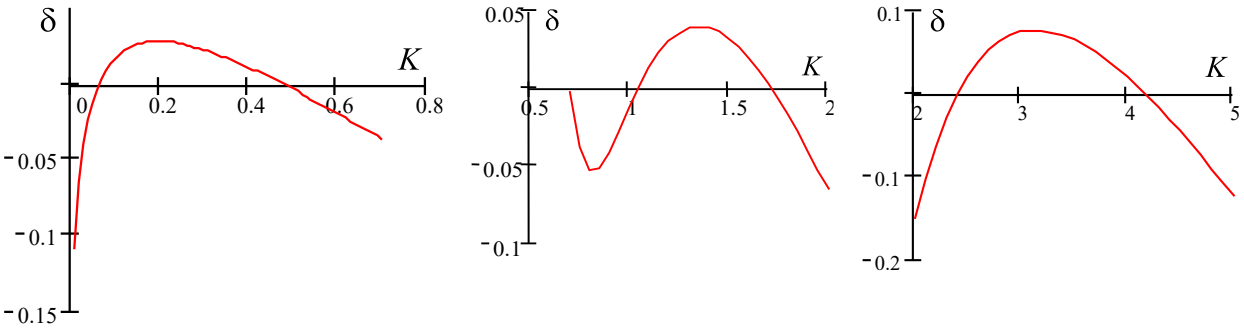
Рис. 3. Залежність ефективного рівня деформації від комплексу умов контактування

На рис. 4 співставлені задані та розраховані значення ефективного рівня деформації. Під заданими слід розуміти значення, визначені з рівняння (8). Під розрахованими – визначені за формулою (9). Оскільки задані та розраховані значення практично збігаються, то для того, щоб оцінити похибку, яка виникає при заміні розрахункового рівняння наближеною формулою (9), на рис. 5 представлена залежність різниці заданих та розрахованих значень ефективного рівня деформації (вона позначена як δ) від комплексу умов контактування.



а) $K \leq 0{,}7$ б) $0{,}7 < K \leq 2$ в) $K > 2$

Рис. 4. Співставлення заданих та розрахованих значень ефективного рівня деформації



а) $K \leq 0{,}7$ б) $0{,}7 < K \leq 2$ в) $K > 2$

Рис. 5. Оцінка похибки, яка виникає при заміні точного рівняння розрахунку ефективного рівня деформації наближеною формулою (9)

Висновки

Із використанням моделювання шорстких спряжених поверхонь ущільнення стохастичним полем було розроблено метод розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень [1].

Для розрахунку ефективного рівня деформації отримано рівняння

$$1 - exp(-K) - \frac{1}{2} erfc\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0 \ , \tag{10}$$

на підставі якого виведена розрахункова формула:

$$u = \begin{cases} -7{,}890 + 4{,}453\, ln(5{,}562 - C), & (K \le 0{,}7); \\ -2{,}089\, exp[-(0{,}620 + C)^{-1{,}302}], & (0{,}7 < K \le 2); \\ -4{,}522\, exp[-(-0{,}062 + C)^{-0{,}967}], & (2 < K \le 5) \end{cases} . \tag{11}$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою ефективного рівня деформації різняться не більше, ніж на 0,11 при $K \le 0{,}7$, 0,065 - при $0{,}7 < K \le 2$ та не більше, ніж на 0,15 при $2 < K \le 5$.

Література

1. 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.

2. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. Полная кривизна, главные кривизны и отношение главных кривизн в вершинах микронеровностей. Удельная площадь гауссовской поверхности и удельный объем зазора // Трение и износ. – 1980. – № 5. – С. 815 – 823.

3. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей / теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

4. Соколан К.С. Розробка на основі теорії стохастичних процесів методу розрахунку коефіцієнту тертя ковзання беззмащувальних поршневих ущільнень. Дис. ... канд. техн. наук. – Хмельницький, 2001. – 204 с.

References

1.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.

2. Semenyuk N.F., Sirenko G.A. Description of the topography of anisotropic rough friction surfaces using a random field model. Total curvature, principal curvatures, and ratio of principal curvatures at the vertices of microroughnesses. Specific area of the Gaussian surface and the specific volume of the gap // Friction and wear. – 1980. – № 5. – P. 815 – 823.

3. Husu A.P., Wittenberg J.R., Palmov V.A. Surface roughness / theoretical-probabilistic approach. – M .: Наука, 1975. – 344 c.

4. Sokolan K.S. Development on the basis of the theory of stochastic processes of a method of calculation of coefficient of sliding friction of non-lubricating piston consolidations. Dis. ... cand. tech. Science. – Khmelnytsky, 2001. – 204 p.

Надійшла / Paper received : 12.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-84-92
УДК 631.3.033

А.Р. СТАРИЙ, А.І. ГОРДЄЄВ
Хмельницький національний університет

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ У ВІБРАЦІЙНІЙ МАШИНІ ЗАНУРЕНИМ ПУЛЬСУЮЧИМ СТРУМЕНЕМ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТИНКАМИ

Проаналізовано способи чистки і мийки та конструкції машин і пристроїв з вібраційним приводом, які реалізують ці способи. Вибір конкретного способу очистки та мийки обумовлюється в залежності від виду та властивостей забруднень, від вимог, що ставляться щодо чистоти виробів, умов та типу виробництва. Розглянуто фізичні основи взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею. Розглянуто фізичні основи створення у насадку вібраційної машини пульсуючого турбулентного потоку рідини. Побудовано амплітудно-частотну характеристику коливань рідини у насадку камери пульсації вібраційної машини. Сформовані завдання подальших експериментальних досліджень.

Ключові слова: очистка, мийка забруднень, вібраційна машина,динамічні параметри процесу та машини.

A.R. STARIY, A.I. HORDEEV
Khmelnytsky National University

TECHNOLOGY OF CLEANING AND MIXING OF POLLUTION OF MACHINE PARTS AT THE REPAIR OF THE FLOW OF LIQUID WITH SOLID PARTICLES AND A VIBRATING MACHINE FOR ITS REALZATION

On the surface of parts and assemblies in the process of their manufacture, operation of machinery and equipment, technological and industrial contaminants are formed. Qualitative cleaning of objects from contaminants is achieved by a complex physico-chemical and mechanical impact on it, the first - is provided by the use of chemicals that affect pollution, the second - the use of mechanical energy of pollution (scrapers, brushes, liquid jets, abrasive jets). To ensure proper cleanliness and surface quality of machine parts, a number of processes using mechanical action have been developed. The share of special equipment that is made for washing to clean parts is quite high. To meet the needs of industry in this regard is possible through the introduction of cleaning and washing machines, built on aggregate and modular element base, which are not inferior to similar, special and provide high unification and flexibility.

The methods of cleaning and washing and the design of machines and devices with vibrating drive, which implement these methods, are analyzed. They all have their advantages and disadvantages. The choice of a particular method of cleaning and washing depends on the type and properties of contaminants, the requirements for the purity of products, conditions and type of production. The need to create special installations for the operation of cleaning and washing of machine parts during repairs in small-scale production is an urgent scientific and technical task. The aim of the work is to create new methods of cleaning and washing and vibrating machines with the use of flooded pulsating jets of liquid with solid particles. The theoretical bases of the cleaning and washing process are considered. The dependence of the productivity of the cleaning process in a vibrating machine with a pulsating jet of liquid and solid particles is obtained. It is established that to increase the productivity of the cleaning process it is necessary to find the optimal ratio of the number of particles in the jet at the smallest distance from the nozzle to the surface to be cleaned when reaching the highest particle velocity. The physical bases of the interaction of a pulsating turbulent fluid flow with solid particles with a contaminated surface are considered. The physical bases of creation of a pulsating turbulent liquid flow in the nozzle of the vibrating machine are considered. The amplitude-frequency characteristic of fluid oscillations in the nozzle of the pulsation chamber of the vibrating machine is constructed. Tasks of further researches are formed.

Keywords: cleaning, dirt washing, vibrating machine, dynamic process and machine parameters.

Вступ

На поверхні деталей і складальних вузлів в процесі їх виготовлення, експлуатації машин і устаткування утворюються технологічні та виробничі забруднення. Якісне очищення об'єктів від забруднень досягається комплексним фізико-хімічним і механічним впливом на нього, перше – забезпечується використанням хімічних речовин, що впливають на забруднення, друге – використанням механічної енергії впливу на забруднення (скребки, щітки, струмені рідини, струмені абразиву). Для забезпечення належної чистоти і якості поверхні деталей машин розроблено ряд процесів з використанням механічної дії. Частка спеціального обладнання, яке виготовляється для миття для очищення деталей досить висока. Задовольнити потреби промисловості в цьому плані можливо за рахунок впровадження очисних та мийних машин, побудованих на агрегатній і модульної елементній базі, які не поступаються подібним, спеціальним і забезпечують високу уніфікацію і гнучкість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питаннями теорії та практики очистки і мийки деталей при виготовлені та ремонті займалися багато вчених дослідників, а саме: Л. М. Гуревич, Ю. С. Козлов, А. А. Куликов, М. Б. Латишенко, А. П. Садовський, М. Ф. Тельнов, Р. І. Сілін, Н. А. Сівченко, але поява нових технологічних процесів виготовлення деталей, нових вимог до якості ремонту різноманітних об'єктів техніки призводить до пошуку нових технологій і методів та створення нових конструкцій установок для та мийки деталей об'єктів, особливо у серійному і дрібносерійному та одиничному типах виробництва при виготовлені деталей та ремонту обладнання.

Процесами оздоблювально-зачищувальної віброобробки займались А. П. Бабічев, М. Е. Шаінський,

А. В. Міцик, В. А. Федоровіч, струміно-абразивною обробкою мілких деталей А. Е. Проволоцкий, А. А. Анділахай, Ф. В. Новіков, А. Б. Цигановській. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що гідроабразивне зношування відбувається в умовах ударної

дії твердих частинок на поверхню тіла. Залежно від властивостей матеріалів і кута атаки абразивними частинками зношування може мати природу крихкого руйнування (знос силікатного скла), мікрорізнання (знос міді), пластичного відтискування, виникнення і зростання мікротріщин. Інтенсивність зношування залежить від кута атаки [1], швидкості потоку, концентрації, розміру, твердості абразивних частинок, співвідношення твердості поверхні матеріалу і абразивних частинок. Зі зменшенням кута атаки знижується величина ударного імпульсу, збільшується ймовірність мікрорізання поверхні.

Якісне очищення об'єктів досягається за рахунок комплексної взаємодії фізико-хімічного та механічного впливу миючого струменя на забруднення. Фізико-хімічний фактор забезпечується застосуванням нагрітих миючих розчинів, що пов'язано зі значними матеріальними витратами на придбання і нагрів цих розчинів при несприятливому впливі їх на навколишнє природне середовище. Тому, розробка технології для поліпшення якості ремонту і технічного обслуговування обладнання, з поверхні деталей та вузлів необхідно видаляти не тільки слабо і середньо зв’язані забруднення (дорожній бруд, олійно-грязьові відкладення і т.д.), але і міцно зв’язані (продукти корозійного руйнування, старе лакофарбове покриття та т.п.), які займають близько 10% загальної площі поверхні об'єктів і мають найбільшу трудомісткість видалення.

Підвищення ефективності очисних та миючих установок досягається за рахунок підвищення механічної дії струменя на забруднення. Найбільш перспективними і поширеними з існуючих на сьогоднішній день технологій очищення та миття об'єктів є технології з використанням водяних струменів високого тиску [2-4]. Останнім часом зростання ефективності очищення машин при використанні технологій струминного очищення досягається за рахунок збільшення кінетичної енергії струменя шляхом підвищення тиску подачі миючої рідини або додаванням до неї абразивного матеріалу. Як збільшення механічного фактора, використовується застосування абразиву, як окремо (сухі струмені), так і спільно з миючим розчином (водо-піскструминна обробка) або підвищення тиску мийного струменя [5].

Дані способи забезпечують значну якість миття та очистки і високу продуктивність, але їх робота пов'язана зі значними енергетичними затратами через велику потужність приводу, яка необхідна для подачі води і абразиву. З метою очистки конкретного забруднення необхідно розробляти технології очистки, які здійснюють зрив забруднюючого матеріалу під дією додаткових напружень, створених у потоці миючої рідини за допомогою абразиву або частинок полімерної крихти. Для мийки забруднень перспективним є застосування вібраційних приводів в обладнанні та явище кавітації, яке має значну руйнівну енергією, а газові пухирці, які не сплеснулись, збільшують силу тертя газорідинного потоку на поверхні забруднення [6].

Відомі способи та конструкції машин та пристроїв з вібраційним приводом для чистки та мийки деталей та вузлів для різних забруднень, які виникають при виробництві або ремонті обладнання та техніки [7-9]. Пристрій [7] для мийки деталей містить ванну для миючої рідини, діафрагму, трубку сопло, сітку для розміщення деталей, електромагнітний вібраційний привод. Вадою даного пристрою є невелика амплітуда коливань мембрани при значній частоті (50 Гц), що створює невелику швидкість струменю з насадка, а також неможливість промивати виріб з різних боків. Пристрій [8] для мийки мілких деталей містить ванну для миючого розчину, дно якої має можливість коливатися, касету з деталями, яка встановлюється у ванну. Мийка деталей здійснюється періодичним омиванням поверхонь деталі мийною рідиною з великими швидкостями.

Створення вібраційного обладнання з пульсуючим робочим тілом на основі гідропульсатора (ГП) [6,9], у якому робоче тіло виступає як інструмент, стримується недостатністю теоретичних та експериментальних досліджень в цій області. Цим зумовлюється актуальність роботи. Як показали раніше виконані дослідження динамічних явищ у рідинних середовищах [6], підданих керованим вібраційним впливам, що вони можуть бути успішно використані для здійснення та інтенсифікації зазначених процесів.

Актуальність дослідження

Потреба у створені спеціальних установок для виконання операції очистки та мийки деталей машин при ремонті у дрібносерійному виробництві є актуальним науково-технічним завданням. Метою роботи є створення нових способів очищення і мийки та вібраційних машин із застосуванням затоплених пульсуючих струменів рідини з твердими частинками.

Виклад основного матеріалу

Режими очистки та мийки поверхні деталі потоком миючої рідини (оптимальну технологію) визначають, виходячи з аналізу гідродинамічної взаємодії миючої рідини з частинками з існуючим забрудненням на деталях, а також на підставі аналізу результатів експериментальних досліджень. У цьому зв'язку, розглянемо механізм видалення забруднень зануреним пульсуючим потоком миючої рідини із включеннями твердих частинок. Не применшуючи при цьому значення фізико-хімічних факторів, обумовлених активністю миючого середовища, вважається, що процес механічного впливу рідини на забруднення є однією з основних умов, що визначає ефективність очистки та мийки. Процес очистки та мийки поверхні виробу потоком рідини з твердими частинками можна розділити на наступні, зв'язані між собою, елементарні процеси: формування пульсуючого струменю рідини з твердими частинками, подача потоку рідини до поверхні, що очищується, відрив частинок забруднень та їх змивання з поверхні, що очищається, зависання забруднень у потоці рідини, транспортування забруднень до фільтруючого пристрою.

На рис.1 представлена схема роботи вібраційної машини для очищення та мийки деталей машин у пульсуючому потоці рідини з твердими частинками [10]. Вона складається з ванни 1 у якій на дні встановлено камеру пульсації 2, яка з'єднана штоком з вібраційним приводом 4. В неї встановлено короб 7 для збору твердих частинок 11 із сіткою 6 знизу над соплом та на бічних поверхнях 9 для розтікання потоку рідини. У коробі 7 над сіткою 6 на яку направлений струмінь з насадка 5 встановлено сопло 8 із зазором $h1$для попадання твердих частинок на сітку 6, які засипаються у короб 7. Працює вібраційна машина наступним чином. Деталь 12, що очищується, розташовується на соплом 8 із зазором H (більшим за максимальний розмір твердої частинки). Включається віброприпід машини 4. Завдяки коливанням мембрани з дисками 3 у камері пульсації 2 почергово виникає стиснення рідини при ході її вверх – виникає струмінь з насадка 5, а при ході її вниз розрядження рідини – вона втягується крізь насадок 5 у камеру пульсації. Струмінь з насадка 5 проходить крізь сітку 6 і ежектує тверді частинки 11 та крізь сопло 8 потік суміші вдаряє по поверхні12, що очищається. Тверді частинки 11, після взаємодії з поверхнею12, потоком рідини відкидаються на стінки коробу7 та падають на його дно. При ході мембрани з дисками 3 вниз виникає потік рідини на зрізі насадка, який затягує тверді частинки 11 на сітку 6 над соплом 5. Далі цикл повторюється.

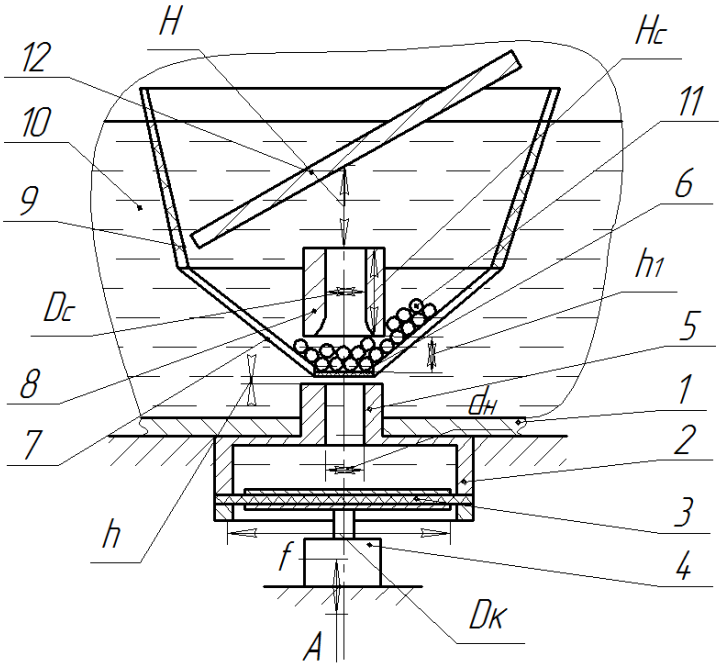


Рис.1 - Схема роботи вібраційної машини для очищення та мийки деталей машин у пульсуючому потоці рідини з твердими частинками: 1 – корпус ванни; 2 – камера пульсації; 3 – мембрана з дисками; 4 – віброприпід; 5 – насадок; 6 – сітка; 7 – короб для збору твердих частинок; 8 – сопло; 9 – сітка; 10 – миюча рідина; 11 – тверді частинки; 12 – поверхня, що очищується; H – відстань від сопла до поверхні, що очищується; Hc – висота сопла; h – відстань від насадка до сітки; h1 – відстань від сітки до сопла; dн – діаметр насадка; Dк – діаметр камери пульсації; Dc – діаметр сопла; f – частота коливань віброприводу; A – амплітуда коливань віброприводу

Розглянемо процес зняття забруднення з поверхні деталі та проаналізуємо вплив різних фізичних параметрів на його продуктивність. Виходячи з результатів досліджень автора [11] продуктивність процесу очищення залежить від багатьох факторів але домінуючим є швидкість потоку рідини з твердими частинками. Величина зняття матеріалу G_Σ з часом обробки в залежності різних факторі визначається за залежністю:

$$G_\Sigma = \frac{\pi \cdot k \cdot k_V \cdot \alpha \cdot Q \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot D \cdot V_ч^3 \cdot L^2 \cdot tg^2\beta(1-k_г) \cdot t}{2 \cdot H_{тв.м.}}, \quad (1)$$

де k– коефіцієнт, який характеризує вид зношування;$k_V = 0{,}121$– безрозмірний коефіцієнт; α – коефіцієнт, який враховує простір між частинками; Q – концентрація частинок в одиниці об'єму суспензії; ρ_1, ρ_2 – густина матеріалу частинок і деталі; D – характерний розмір частинки; k – коефіцієнт, який характеризує вид зношування; $V_ч$ – швидкість удару частинки по поверхні; L – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється; k – коефіцієнт, який характеризує вид зношування; $H_{тв.м.}$ – динамічна твердість матеріалу за Майєром; β – кут, нахилу зовнішніх границь струменю до її осі; t – час оброблення.

Автор [12] виходячи з аналізу залежності (1) наводить розрахункову залежність продуктивності процесу зрізання матеріалу W однією частинкою з урахуванням підвищення ефективності за рахунок збільшення кінетичної енергії частинки та зменшенням умовного напруження різання і в залежності відстані від сопла струменя до поверхні, що оброблюється.

$$W = \frac{k_0 \cdot m \cdot V_ч^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}, \quad (2)$$

де k_0 – кількість абразивних зерен, які приймають участь в процесі обробки; m – маса частинки; $V_ч$ – швидкість удару частинки по поверхні; σ – умовне напруження різання матеріалу (енергоємність оброблення); H – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється.

З аналізу залежностей (1) та (2) можна зробити висновок, що для збільшення продуктивності процесу очищення необхідно знайти оптимальне співвідношення кількості частинок у струмені при найменшій відстані від сопла до поверхні, що очищується при досягненні найменших напружень різання матеріалу та основним фактором, який впливає на продуктивність процесу є швидкість частинки, яка має у формулах (1) та (2) третю ступінь і невелика її зміна призводить до значного підвищення продуктивності.

Для запропонованої схеми рис.1 з урахуванням, що пульсуючий потік рідини утворюється вібраційним приводом у камері пульсації з насадком, швидкість руху рідини у камері пульсації знаходиться за залежністю:

$$V = 2 \cdot A \cdot f, \quad (3)$$

де A – амплітуда коливань рідини у камері пульсації; f – частота коливань рідини у камері пульсації;

З урахуванням нерозривності потоку рідини $A \cdot S_к = A_н \cdot S_н$ та умовою, що швидкість твердих частинок дорівнює швидкості рідини на виході з насадку, V запишемо наступну залежність:

$$V = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot D_к^2 \cdot A \cdot f}{d_н^2}, \quad (4)$$

де ε – коефіцієнт звуження потоку у насадку; $D_к$ – діаметр камери пульсації; $d_н$ – діаметр насадка.

Зробивши припущення, що швидкість потоку рідини та твердих частинок незмінна при проходженні сопла та врахувавши гасіння швидкості струменю з насадка при проходженні сітки коефіцієнтом K_c=0,9 отримаємо наступну залежність:

$$V_{ч.0} = \frac{2 \cdot k_c \cdot \varepsilon \cdot D_к^2 \cdot A \cdot f}{d_н^2}, \quad (5)$$

На відрізку H величина швидкості круглого струменя з сопла змінюється за залежністю Абрамовича:

$$V_ч = \frac{0{,}645 \cdot V_{ч.0}}{1 + \frac{2H}{D_c} tg\alpha}, \quad (6)$$

де $V_{ч.0}$ - початкова швидкість потоку рідини та частинок з сопла; D_c - діаметр сопла; α - кут одностороннього розширення струменю з сопла, $\alpha = 12^0 40^/$.

З урахуванням залежності (6) отримаємо:

$$V_ч = \frac{0{,}645 \cdot \frac{2 \cdot k_c \cdot \varepsilon \cdot D_к^2 \cdot A \cdot f}{d_н^2}}{1 + \frac{2H}{D_c} tg\alpha}. \quad (7)$$

Враховуючи зміну початкової величини швидкості та частинок при виході потоку рідини з сопла із відстанню до поверхні (6), що очищується, можна записати наступну залежність для визначення продуктивності вібраційної машини:

$$Q = \frac{k_0 \cdot m \cdot \left(1{,}29 \frac{k_c \cdot \varepsilon \cdot D_к^2 \cdot A \cdot f}{d_н^2} / 1 + \frac{2 \cdot H}{D_c} tg\alpha\right)^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}, \quad (8)$$

З отриманої залежності (8) встановлено, що на продуктивність процесу очищення у вібраційній машині при незмінних параметрах, які входять у залежність, впливають як конструктивні параметри машини (розміри камери пульсації та насадку, діаметр сопла, відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється) так і режими роботи віброприводу (частота та амплітуда коливань).

Розглянемо фізичні основи взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею. При вимірюванні максимальної швидкості потоку, яка виникає у вібраційній машині і має турбулентний пульсуючий характер, виникають складності фіксації швидкості процесу (наявність датчиків швидкості, їх розміри, інерційність та процес тарування). Тому для зручності оцінювання величини швидкості потоку можна перейти на вимірювання його максимального тиску. Сила тиску потоку рідини, що діє на поверхню, залежить від швидкості і визначаються за формулою Д. Бернуллі [13]:

$$P = \frac{\gamma}{g} S V^2 \sin\xi \quad , \quad (9)$$

де γ – питома вага рідини; g – прискорення вільного падіння; S – площина перерізу потоку; V – швидкість потоку з насадка; ξ – кут нахилу площини, що очищується до лінії дії потоку.

Дійсне значення P відповідно дещо менше за розрахункове [14]:

$$P = (0{,}92...0{,}96)\frac{\gamma}{g} S V^2 \sin\xi . \quad (10)$$

Потік миючої рідини у пульсуючому струмені, при взаємодії із забрудненою поверхнею, розплющується та розтікається в сторони від центру контакту з поверхнею (рис.2). При цьому, на забруднену поверхню з боку потоку з частинками, діє осереднений гідродинамічний тиск частинки та потоку (нормальний та дотичний), який визначається за залежністю:

$$P = \frac{\rho_ч \cdot V_ч^2}{2} \sin\xi, \quad (11)$$

де P – осереднений тиск частинки та струменя рідини; $\rho_ч$ – щільність матеріалу твердої частинки; $V_ч$ – осереднена швидкість частинки та струменя рідини; ξ – кут нахилу поверхні до осі струменя.

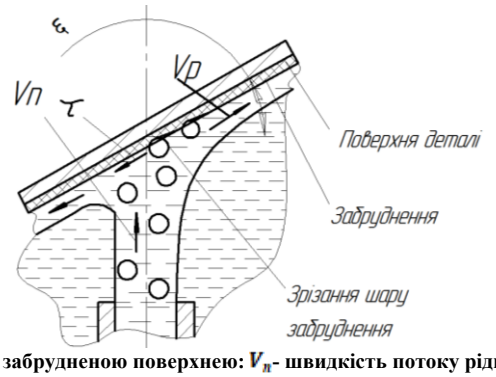


Рис.2 – Схема взаємодії потоку рідини з забрудненою поверхнею: $V_п$- швидкість потоку рідини з твердими частинками на виході з сопла; τ - сила тертя потоку рідини з частинками; F - кут нахилу поверхні деталі із забрудненням; $V_р$ - швидкість розтікання рідини по поверхні

При турбулентному режимі руху рідини з частинками повздовж поверхні із забрудненням відбувається енергійне хаотичне перемішування рідини та виникають дотичні напруження тертя потоку рідини. В загальному випадку осереднений турбулентний потік одночасно має молекулярну й турбулентну в'язкість. Тому повне сумарне дотичне напруження тертя потоку рідини без включень на поверхні визначається за формулою:

$$\tau = (\mu + A)\frac{d\bar{u}}{dy} \quad , \tag{12}$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази; A – коефіцієнт пропорційності, що називається динамічним коефіцієнтом турбулентного обміну; $\frac{d\bar{u}}{dy}$ – градієнт швидкості.

Для двофазних середовищ (рідина з включеннями твердих частинок) широке розповсюдження має поправка Ейнштейна до динамічного коефіцієнта несучої фази.

Врахувавши її, тоді узагальнений динамічний коефіцієнт несучої фази можна виразити через відповідні коефіцієнти: μ – для чистої несучої фази; μ^* – для домішок твердих частинок із сферичною формою частинок.

Тому динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази прийме вигляд:

$$\mu^* = \mu\left(1 + \frac{5}{2}\alpha\right), \tag{13}$$

де α – об'ємна доля домішок твердих частинок.

З урахуванням (13) дотичні напруження тертя турбулентного потоку несучої фази з включеннями твердих частинок можна представити наступним виразом:

$$\tau = \left[\mu\left(1 + \frac{5}{2}\alpha\right) + A\right]\frac{d\bar{u}}{dy}. \tag{14}$$

Дотичні напруження тертя турбулентного потоку несучої фази з включеннями твердих частинок значно більше і залежать від об'ємної долі домішок твердих частинок.

Окрім збільшення дотичних напружень між потоком рідини та забрудненням можливий процес вдавлювання твердої частки у забруднення, а потім ініціювання процесу зрізання забруднення завдяки наявності гострих крайок на полістиролові крихті завдяки розтіканню потоку по поверхні (рис.2).

Розглянемо фізичні основи створення у вібраційній машині пульсуючого турбулентного потоку рідини. Система диференційних рівнянь, яка описує коливання рідини у камері пульсації (рис.1) має вигляд:

$$\begin{cases} A_м dS_м = A_н dS_н; \\ m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = F, \end{cases} \tag{15}$$

де F – сила, яка діє на мембрану з дисками, $F = \frac{\pi \cdot D_м^2 \cdot P_{\max}(\omega)}{4}$; m – маса рідини, яка отримує коливальний рух; $S_н$ – площа насадка; $S_м$ – площа мембрани; $P_{\max}$ – максимальний тиск у камері пульсації, який залежить від частоти коливань; C – жорсткість пружної мембрани; k – демпфуюча здатність.

Демпфуючу здатність k рідини знайдемо за формулою:

$$k = \frac{8 \cdot \pi \cdot D_м^4}{d_н^2}\mu \cdot l = 0{,}0113, \tag{16}$$

де μ – динамічний коефіцієнт щільності, $\mu = 8{,}94 \cdot 10^{-4}$ $Па \cdot с$; l – довжина отвору, $l = 0{,}045 м$.

Для аналізу залежності швидкості в насадку від частоти коливань приводу побудуємо амплітудно-частотну характеристику коливань рідини у насадку камери пульсації вібраційної машини. Для цього проведемо перетворення другого рівняння системи (15) поділивши його ліву та праву частину на C та провівши заміни.

$$\frac{m}{c}\ddot{x} + 2\xi\frac{k}{c}\dot{x} + x = \frac{F}{c}. \tag{17}$$

$$\frac{m}{c} = T_2^2. \qquad \frac{k}{c} = T_1. \qquad \frac{F}{c} = k_1.$$

Друге рівняння системи (15), після перетворень за Лапласом має наступний вигляд в операторній формі:

$$T_2^2 p^2 X_{вих}''(p) + 2 \cdot \xi \cdot T_1 p X_{вих}'(p) + X_{вих}(p) = k_1 X_{вх}(p). \tag{18}$$

Передаточна функція для рівняння (18) має наступний вигляд:

$$W_{(p)} = \frac{X_{вих}(p)}{X_{вх}(p)} = \frac{k_1}{T_2^2 p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_1 p + 1}. \tag{19}$$

Підставивши заміну $p = j\omega$ отримаємо наступну залежність:

$$W_{(j\omega)} = \frac{k\left[(1 - T_2^2\omega^2) - jT_1\omega\right]^2}{(1 - T_2^2\omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T_1\omega)^2}. \tag{20}$$

Амплітудно-частотна характеристика з рівняння (20) визначається наступним чином:

$$A(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - T_2^2\omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T_1\omega)^2}}. \tag{21}$$

Визначимо необхідні данні для розрахунку: діаметр камери 100 мм; діаметр насадка 10 мм; маса рідини, що коливається $m = 0{,}01кг$; жорсткість гумової мембрани $C = 0{,}6МПа$ [15]; $k = 0{,}0113Па \cdot c$; $F = 0{,}0785 \cdot P_{\max}(\omega)$; $\xi = 0{,}5$ - коефіцієнт, який враховує звуження потоку рідини при перетіканні з камери до насадка;

$$\frac{m}{c} = T_2^2 = \frac{0{,}01}{0{,}6} = 0{,}0166; \quad \frac{k}{c} = T_1 = \frac{0{,}0113}{0{,}6} = 0{,}0189;$$

$$\frac{F}{c} = k_1 = \frac{0{,}0785 \cdot P_{\max}(\omega)}{0{,}6} = 0{,}13 P_{\max}(\omega).$$

Застосувавши дослідну установку, датчик тиску MPM489 та USB осцилограф BM8020, який з'єднано з персональним комп'ютером через порт USB и обслуговується програмним продуктом «DiSco», було проведено вимірювання величини зміни максимального тиску у камері пульсації від частоти. У результаті проведених експериментів було встановлено залежність тиску у камері пульсації $P_{мах}$ від частоти. Результати представлені на графіку рис. 3 і враховані при розрахунку.

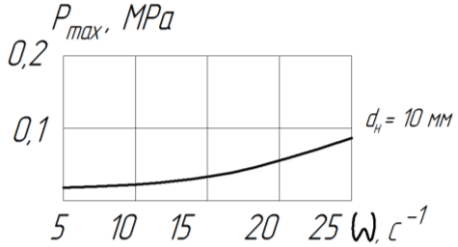


Рис.2. Залежність максимального тиску у камері пульсації діаметром 100 мм від частоти

Провівши підстановку даних у (21) та за допомогою програмного продукту MatchCad були проведені розрахунки згідно рівняння (21) і побудовано графік амплітудно-частотної характеристики, представленої на рис.3.

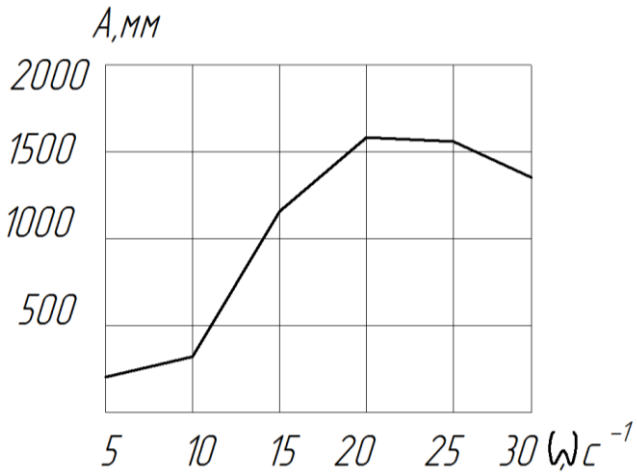


Рис.3. Амплітудно-частотна характеристика руху рідини у насадку вібраційної машини

Знаючи величину амплітуди коливання струменя у насадку можна розрахувати швидкість руху рідини на виході з насадка за формулою [16]:

$$V = \varphi\sqrt{2gH}, \tag{22}$$

де ϕ - коефіцієнт швидкості,$\phi = 0{,}97$; g - прискорення сили тяжіння; H - геометричний натиск рідини, $H = A$.

З проведених розрахунків та з графіка рис.3 встановлено, що залежність величини переміщення рідини у насадку від частоти має нелінійний характер і відповідно максимальний тиск у струмені з насадка знаходиться у межах частот від 16 до 22ω, c^{-1}тому і струмінь з насадку має максимальну швидкість у цих межах.

У результаті аналітичних досліджень встановлено, що наявність у потоці рідини частинок або газових пухирців, які утворюються при протіканні рідини через насадок з гострими крайками на вході, збільшуються дотичні напруження тертя, а мілкі газові бульбашки поводяться як «тверді частки» у двофазному середовищі, що дозволяє підвищити інтенсивність процесу мийки забруднень. А при наявності у потоці рідини частинок (полістиролової крихти), з твердістю більше ніж твердість забруднення, дозволяє збільшити нормальні та дотичні напруження потоку рідини та створити умови мікрозрізання забруднення. Усі ці фактори направлені на збільшення продуктивності очищення та мийки забруднень.

Раніше встановлено [6,12,13], що швидкість струменю значно зменшується з відстанню від сопла до поверхні, що очищується. З метою збереження максимальної швидкості потоку рідини з твердими частинками необхідно витримувати наступні рекомендації по конструктивним залежностям вузла створення потоку з твердими частинками вібраційної машини: зазор між зрізом насадка та сіткою 6 (рис.1) вибираємо за умови$h = 1 - 2мм$; відстань між сіткою 6 (рис.1) та зрізом сопла вибираємо за умови $h_1 = (2 - 2{,}5)d_{тв.частки}$ $мм$; довжину сопла вибираємо за умови $H_c = 15 - 20мм$.

Висновки

Розглянуто аналітичну модель продуктивності процесу зняття забруднення з поверхні деталі та встановлено вплив різних фізичних параметрів на його продуктивність, а саме: оптимальне співвідношення кількості частинок у струмені при найменшій відстані від сопла до поверхні, що очищується, найменших напружень різання матеріалу та швидкості потоку з частинками, яка залежить від параметрів режиму роботи приводу вібраційної машини.

Розглянуто аналітичну модель взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею та встановлено, що турбулентний пульсуючий потік рідини із частиками має більш значні сили тертя при розтіканні по поверхні із забрудненням та можливий процес його мікрозрізання твердими частками.

З аналізу побудованої аналітичної моделі коливального процесу рідини у камері пульсації з насадком в робочому органі вібраційної машини отримано амплітудно-частотну характеристику руху рідини у насадку, яка пов'язана із величиною швидкості та тиском струменя з насадка і має нелінійний характер, а у межах частот від 16 до 22ω, c^{-1} має максимальну швидкість та відповідно тиск у струменю.

Для подальшого проведення досліджень та створення методики проектування вібраційної машини для очистки і мийки необхідно виконати наступні завдання: експериментально встановити взаємозв'язок конструктивних параметрів з режимами роботи приводу вібраційної машини; визначити оптимальний об'єм твердих часток; визначити оптимальну амплітуду та частоту коливання приводу для створення струменя з максимальним тиском у насадку; провести порівняльні дослідження по продуктивності очищення та мийки модельних забруднень.

Література

1. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. –270 с.

2. Козлов Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, Н.Ф. Тельнов. – М.: Машиностроение, 1982. – 261 с.

3. Тельнов Н.Ф. Технология очистки сельскохозяйственной техники / Н.Ф. Тельнов. – М.: Колос, 1983. – 256 с.

4. Козлов Ю.С. Очистка автомобилей при ремонте / Ю.С. Козлов. – М.: Транспорт, 1981. – 151 с.

5. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. − Мариуполь: ПГТУ, 2006. − 190 с.

6. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 386 с.

7. А. с. 1130422 СССР, МКИЗ В 08 В 3/10. Устройство для мойки мелких изделий / А.И. Гордеев, Р.И. Силин, Н.А. Сивченко (СССР). – № 3613130/28–12; заявл. 15.04.83; опубл. 23.12.84, Бюл. № 47.

8. А. с. 880519 СССР, МКИЗ В 08 В 3/10. Устройство для промывки изделий / Р.И. Силин, В.П. Кошель, А.И. Гордеев (СССР). – № 2869224/28–12; заявл. 17.12.79; опубл. 15.11.81, Бюл. № 42.

9. Пат. на корисну модель 116030 України, МПК B03B 5/02. Вібраційна машина для мийки радіотехнічних виробів / Гордєєв А. І., Гордєєв О.А. Мігаль В. Г. (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – u 2016 10059; Заяв. 03.10.2016; Опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

10. Пат. на корисну модель № 132837, МПК B08B 3/10 Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання. Скиба М. Є., Старий А. Р., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. U201810344; Заявл. 19.10 2018. Опубл. 11.03.2019. Бюл. №5.

11. Цыгановский А. Б. Производительность гидроабразивной обработки затопленными струями / А.Б. Цыгановский // Збірник наукових праць Східноукраїнського державного університету. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми електронної промисловості у перехідний період”. – Луганськ, СУДУ, 1998. – С. 48–51.

12. Андилахай А. А. Условия повышения производительности абразивной обработки / А. А. Андилахай. – Вісник НТУ "ХПІ", №53(959). 2012. – С. 42-47.

13. Бернулли Д. Гидравлика или записки о силах и движениях жидкости / Д. Бернулли. – М. : ГИТТЛ, 1959. – 248 с.

14. Садовский В. И. Очистка деталей гидравлическими струями при ремонте тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / В. И. Садовский. – М., 1972. – 146 с.

15. Сілін Р. І. Визначення характеристики деформаційної здатності мембрани пульсаційної камери устаткування для очищення / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Ю. В. Савицький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 2. – С. 67–70.

16. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Выща школа, 1984. – 343 с.

References

1. Tenenbaum M.M. Resistance to abrasion. M .: Mashinostroenie, 1976. – 270 p.

2. Kozlov Yu.S., Kuznetsov O.K., Telnov N.F. Cleaning products in mechanical engineering. Moscow: Mechanical Engineering, 1982. - 261p.

3. Telnov N.F Technology of cleaning of agricultural machinery. M .: Kolos, 1983. – 256 p.

4. Kozlov Yu.S. Cleaning cars at repairs. M .: Transport, 1981. - 151 p.

5. Andilahai A.A. Abrasive treatment of parts with flooded jets. Mariupol: PGTU, 2006. – 190 p.

6. Silin R.I., Hordeev A.I. Vibration equipment on the basis of a hydropulse: a monograph. Khmelnytsky: KhNU, 2007. – 386 p.

7. A. s. 1130422 USSR, MKI3 at 08 V 3/10. Device for washing small articles / A.I. Hordeev, R.I. Silin, N.A. Syvchenko (USSR). - №.3613130 / 28-12; stated. April 15, 83; published 23.12.84, Bull. № 47.

8. A. s. 880519 USSR, MKI3 at 08 V 3/10. Device for product rinsing / R.I. Silin, V.P. Koshel, A.I. Hordeev (USSR). - No. 2869224 / 28-12; stated. 17.12.79; published November 15, 81, Bull. № 42.

9. Pat. to utility model 116030 of Ukraine, IPC B03B 5/02. Vibration machine for sinking radio products / Hordeev AI, Hordeev O.A. Migal V.G.; Applicant and patent holder Khmelnitsky National un - u 2016 10059; Application 03.10.2016; Published by May 10, 2017, Bul. № 9.

10. Pat. for utility model No. 132837, МПК B08B 3/10 Vibration machine for purification of contaminations by a stream of solid particles and washing of details at repair of equipment. Skyba M.E., Stariy A.R., Hordeev A.I., Hordeev O.A. U201810344; Declared 19.10 2018. Published March 11, 2019. Bull №5.

11. Tsyganovskiy A.B. Productivity of hydroabrasive treatment with flooded jets. Collection of Science Practitioners of the Skhidnoukrainsky State University. Materials of the International Scientific and Practical Conference “Problems of Electronic Industry in the Transition Period”. - Lugansk, COURT, 1998. – pp. 48-51.

12. Andilakhai A.A. Conditions for increasing the productivity of abrasive processing . - Bulletin of NTU "KhPI", №53. 2012. pp. 42-47.

13. Bernoulli D. Hydraulics or notes on the forces and movements of a liquid. - M.: GITTL, 1959 . – 248 p.

14. Sadovskiy V.I. Cleaning of parts with hydraulic streams in the repair of tractors, automobiles and agricultural machines: dis. cand. tech. sciences: 05.02.08. - M., 1972 . – 146 p.

15. Silin R. I., Hordeev A.I., Savitskiy Yu. V. Viznachennya characteristics of the deformation of the membrane of the pulsation chamber of the device for cleaning. Vimiryuvalna and numerical technology in technological processes.1997. №2. – pp. 67-70.

16. Handbook of hydraulics / ed. V. A. Bolshakova. - 2nd ed., Rev. and add. - K.: Vyscha school, 1984. – 343 p.

Надійшла / Paper received : 25.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-93-100
УДК 621:62-1/-9

А.О. МЕЛЬНИЧЕНКО, М.М. РУБАНКА, В.П. МІСЯЦЬ
Київський національний університет технологій та дизайну
О.С. ПОЛІЩУК
Хмельницький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ МАШИНИ УММ-5 ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проведено аналіз сучасних машин для випробування конструкційних матеріалів. Проведено аналіз машин для випробування конструкційних матеріалів, які потребують удосконалення. Визначено шляхи можливого удосконалення існуючих машин. Визначено переваги і недоліки відомих засобів для вимірювання зусиль і деформації. Розроблено елементи конструкції та схемні рішення для удосконалення машини УММ-5, що використовується для експериментального визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів в лабораторії опору матеріалів кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну. Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення діючого устаткування на машинобудівних підприємствах галузі.

Ключові слова: конструкційні матеріали, міцність, машина для випробування, датчик, електрична схема, комп'ютер.

A.O. MELNYCHENKO, M.M. RUBANKA, V.P. MISIATS
Kyiv National University of Technologies and Design
O.S. POLISHCHUK
Khmelnytsky National University

IMPROVEMENT OF UMM-5 MACHINE FOR DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION MATERIALS

Determining the mechanical characteristics of structural materials is very important in the manufacture of products from them for certain operating conditions, in particular under the influence of external deforming forces. The maximum allowable values of relative elongation and tensile strength in tension are determined on a test bench of the type of rupture machine.

The rapid pace of computerization of all aspects of human activity has led to the fact that today computers, and, above all, personal computers, have become an essential attribute of various technical systems. This also applies to modern control and data collection systems, control and measurement and laboratory equipment, ie any complexes, the main task of which is the processing and interpretation of information coming from the "outside world".

As a result, developers and users of specialized systems face the task of adequate docking of devices that receive information from the outside world, namely sensors of various types, with a personal computer, which is the central node of such a system and perform tasks of coordinating system, information processing comes and issues it to the user in the most convenient form for him.

The analysis of modern machines is conducted for the test of construction materials. The analysis of machines is conducted for the test of construction materials that need an improvement. Ways of possible improvement of existing machines are determined. The advantages and disadvantages of the known means for measuring forces and deformation are determined. The paper proposes the improvement of test machines of obsolete type by equipping them with systems for measuring forces and displacements without significantly changing the basic structures. The methodological and theoretical bases of the study are the main provisions of theoretical mechanics, strength of materials and machine elements. Was developed the elements of construction and circuit solutions for improvement the UMM-5 machine, which is used for experimental determination of mechanical characteristics of construction materials in the strength of material laboratory of the Department of Applied Mechanics and Machines of Kyiv National University of Technology and Design. The developed system of combined effort measurement advantageously combines the advantages of classical mechanical meters and electronic data recording means. Improving existing testing machines with the help of the developed system is attractive with low re-equipment costs and does not require significant changes in their design. The research results can be used to improve the existing equipment at machine-building enterprises of the industry.

Keywords: construction materials, strength, test machine, sensor, electrical scheme, computer.

Вступ

Визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів має дуже важливе значення при виготовленні виробів з них для певних умов експлуатації, зокрема при впливі зовнішніх деформуючих сил. Максимально допустимі значення відносного подовження і розривної міцності при розтягуванні визначаються на випробувальному стенді типу розривної машини.

Стрімкі темпи комп'ютеризації всіх сторін людської діяльності призвели до того, що сьогодні комп'ютери, і, перш за все, персональні ЕОМ, стали неодмінним атрибутом самих різних технічних комплексів. Це стосується і сучасних систем управління та збору даних, контрольно-вимірювального та лабораторного обладнання, тобто будь-яких комплексів, основним завданням яких є обробка та інтерпретація інформації, що надходить із "зовнішнього світу".

В результаті перед розробниками і користувачами спеціалізованої системи постає завдання адекватної стикування пристроїв, які сприймають інформацію із зовнішнього світу, а саме датчиків різного типу, з персональним комп'ютером, що є центральним вузлом такої системи і виконують завдання координації роботи системи, обробки інформації, що надходить і видачі її користувачеві в найбільш зручною для нього формі.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси випробувань конструкційних матеріалів при їх деформуванні і руйнуванні. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів, що базуються на основних положеннях теоретичної механіки, опору матеріалів та деталей машин.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання модернізації лабораторних машин для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів, завданням досліджень є визначення можливих шляхів удосконалення існуючого обладнання лабораторії опору матеріалів, що дозволить підвищити точність експерименту, істотно полегшити обробку отриманих результатів, їх систематизацію, зберігання, а також організувати видачу інформації, як в процесі вимірювання, так і по його закінченні в найбільш зручному для користувача вигляді.

Результати та їх обговорення

Для проведення випробувань конструкційних матеріалів на розтяг і стискання застосовують спеціальні пристрої (універсальні розривні машини, випробувальні преси тощо) [1-4]. Розривна машина має спеціальні затискачі, в яких закріплюється випробуваний зразок, що піддається дії поступово зростаючого навантаження, а також пристрої для вимірювання діючого на зразок зусилля та величини деформації. Для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів застосовуються універсальні розривні машини самих різних розмірів, параметрів і відповідно технічних характеристик, розраховані на навантаження від сотих часток ньютона до багатьох кілоньютон [5, 6]. Вимоги до такого роду обладнання регламентуються рядом державних стандартів [7-9]. Так, розривні машини, які застосовуються при випробуванні гуми та пластмаси на розтяг, згин і стискання за постійної швидкості переміщення повинні за своїми технічними характеристиками задовольняти вимогам стандарту ДСТУ ISO 5893:2019. Розривні машини можуть мати різний привід – ручний, електромеханічний (електродвигун – механічна передача) та електрогідравлічний. Найбільш розповсюджені машини з електромеханічним приводом, тоді як електрогідравлічний застосовують в обладнанні для випробувань матеріалів при значно більших робочих навантаженнях.

На рис. 1 представлено зовнішній вигляд універсальної розривної машини для випробування конструкційних матеріалів, якою обладнано лабораторію опору матеріалів кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну.

Універсальна випробувальна розривна машина УММ-5 призначена для статичних випробувань на розтяг, стиск, зріз металевих зразків та інших матеріалів в межах технічних можливостей машини. Розривна машина УММ-5 побудована за принципом розривних машин з механічним навантаженням зразка і з важільно-маятниковим силовимірювачем.

Дане обладнання відноситься до випробувальних машин морально застарілого типу та потребує модернізації, метою якої є доведення метрологічних характеристик до відповідності вимогам стандартів ASTM, ISO, DIN, GB і дооснащення необхідними пристроями вимірювання.

На сьогоднішній час морально застарілі випробувальні машини можуть бути удосконалені в різному ступені глибини модернізації. Авторами пропонується наступний варіант модернізації даного обладнання, що передбачає встановлення електронного реєстратора. Регулювання швидкості навантаження залишається без зміни (виключно за рахунок механічної коробки передач). Електронний реєстратор встановлюється на розривну машину в комплекті з:

- мікропроцесорний блок зі спеціальним програмним забезпеченням (ПЗ);
- датчик зусилля (один або два);
- датчик переміщення;
- персональний комп'ютер (ПК);
- принтер.

Цей варіант модернізації дозволить: проводити всі види випробувань в межах технічних можливостей машини; реєструвати графіки випробувань та відображати всі поточні значення вимірюваних величин на дисплеї в режимі реального часу; аналізувати отримані дані серії випробувань з накладенням кривих; автоматично обробляти отримані результати та представляти їх у вигляді графіків і протоколів з можливістю роздрукування; при необхідності експортувати отримані дані в програмне забезпечення «Microsoft Office Excel 2007» та «Microsoft Office Word 2007», «Adobe Acrobat XI Pro»; працювати з бібліотеками методів випробувань згідно нормативної документації; створювати короткі і розширені звіти по результатам випробувань; автоматично зупиняти процес випробування при руйнуванні зразка або виконанні заданих умов.

Перед модернізацією необхідно провести технічне обслуговування механічної частини навантажувального пристрою і при необхідності здійснити ремонт.

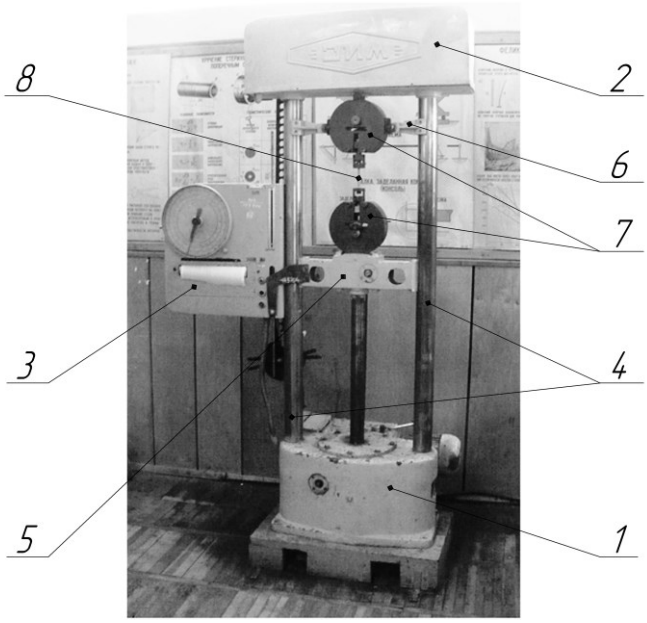


Рис. 1. Зовнішній вигляд універсальної випробувальної розривної машини УММ-5:
1 – силова частина; 2 – силовимірювальна частина; 3 – механізм самописця; 4 – колони; 5 – нижня рухома траверса; 6 – верхня нерухома траверса; 7 – захоплювачі; 8 – випробувальний зразок

Для удосконалення системи вимірювання зусилля, що діє на верхній захват раціонально використати резисторний датчик кута повороту, який потрібно встановити на вісь обертання стрілки динамометра. При цьому кут повороту датчика буде прямо пропорційний зусиллю, що діє на верхній захват.

При проведенні експерименту результати візуального спостереження (за шкалою навантажень) максимального навантаження перед руйнуванням зразка будуть використані для тарування діаграми, яка отримана в цифровому вигляді.

Розроблена авторами статті структурна схема системи вимірювання і реєстрації отриманих даних під час випробувань на розривній машині УММ-5 представлена на рис. 2.

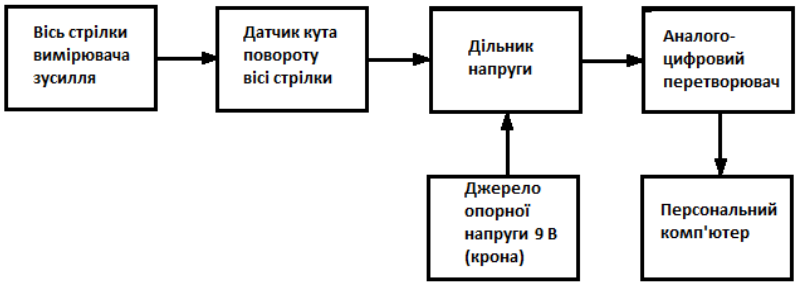


Рис. 2. Схема структурна системи вимірювання і реєстрації даних випробувальної машини УММ-5

У відповідності до схеми, вісь стрілки вимірювачів зусилля (крутного моменту) випробувальних машин жорстко з’єднується з валом резисторного датчика кута повороту за допомогою гнучкої муфти (трубка з ПВХ). Завдяки цьому кут повороту валу датчика буде відповідати куту повороту осі стрілки вимірювача.

Для перетворення кутового показника датчика в електричний сигнал слугує дільник напруги, який формує вихідну напругу в залежності від опору резисторного датчика. Початковий рівень напруги з дільника визначається значенням опорної напруги, яка може бути отримана з елементу живлення, або стабілізованого електричного блоку.

Для перетворення аналогового сигналу з дільника напруги в цифровий сигнал слугує аналого-цифровий перетворювач, який підключений до персонального комп’ютера через USB порт [10-12].

Підключення виходу підсилювача до комп’ютера може бути виконано за допомогою двоканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з USB виходом BA8020 (рис. 3), який може використовуватися для аналізу низькочастотних аналогових сигналів, реєстрації тривалих поволі змінних процесів, а також дослідження двійкових сигналів.

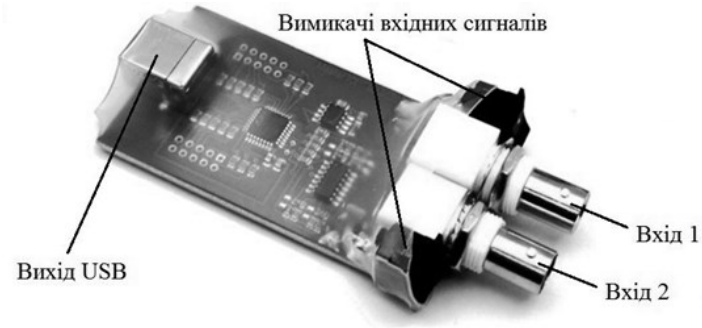


Рис. 3. Зовнішній вигляд аналого-цифрового перетворювача з USB виходом BA8020

Для того, щоб отримати з вхідної напруги опорного джерела лише її частину використовується дільник напруги (voltage divider). Це схема, яка будується на основі пари резисторів (рис. 4).

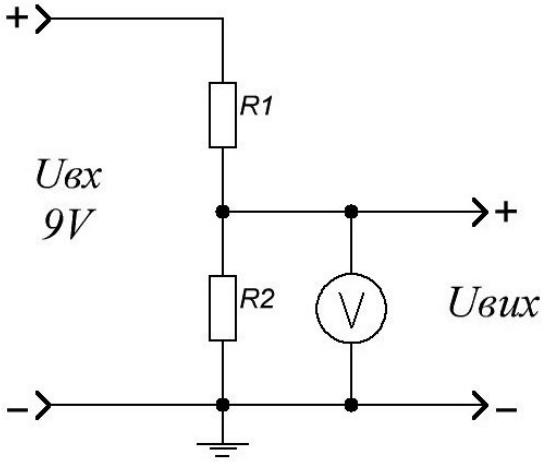


Рис. 4. Схема дільника напруги

Наприклад, на вхід подається напруга величиною 9 В. Але яку напругу отримаємо на виході $U_{вих}$ (рис. 3.4)? Припустимо, що в схемі встановлено резистори з наступним опором: R_1=400 Ом; R_2=500 Ом.

Струм, що протікає через резистори R_1 і R_2 однаковий, оскільки до виходу $U_{вих}$ нічого не підключено. Загальний опір пари резисторів при послідовному з'єднанні визначається за наступним виразом: $R_{заг}=R_1+R_2$=900 Ом.

Силу струму, що протікає через резистори можна вираховувати за формулою: $I=U/R_{заг}$=9/900=0,01А=10мА.

Тепер, коли нам відомий струм, що протікає через резистор R_2, розрахуємо напругу на ньому: $U_{вих}=I\cdot R_2$=0,01·500=5В.

Або, якщо залишити формулу для визначення вихідної напруги в загальному вигляді, отримуємо:

$$U_{вих} = U_{вх} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1)$$

Так за допомогою пари резисторів ми змінили значення вихідної напруги з 9 до 5 В. Це простий спосіб отримати декілька різних напруг в одній схемі, залишивши при цьому тільки одне джерело живлення.

Якщо в наведеній вище схемі (рис. 4) замінити R_1 або R_2 на резистор змінного опору (датчик), $U_{вих}$ буде змінюватися в залежності від зовнішніх умов, що впливають на датчик. Підключивши цю вихідну напругу до аналогового входу аналого-цифрового перетворювача, можна отримувати інформацію про рівень діючих зусиль і моментів.

Значення вихідної напруги при певних параметрах системи можна розрахувати, зіставивши документацію на змінний компонент і загальну формулу розрахунку $U_{вих}$.

Якщо замість постійного резистора R_1 встановити резистор змінного опору, то можливо отримати залежність вихідної напруги від положення повзунка резистора, тобто він буде виконувати функцію датчика переміщення або кута повороту.

В якості датчика використано змінний резистор типу ПТП (потенціометр теплостійкий прецизійний) з номінальним опором 630 Ом (рис. 5) [13, 14].

Визначимо значення опору постійного резистора R_2, який потрібно встановити в дільнику напруги.

З формули (1) маємо:

$$R_1 = \left(\frac{U_{вх}}{U_{вих}} - 1 \right) \cdot R_2 . \qquad (2)$$

Отже значення опору постійного резистора R_1 для зменшення напруги з 9В до 2В повинно становити:

$$R_1 = \left(\frac{9}{2} - 1 \right) \cdot 630 = 2205 \text{ Ом.}$$

Приймаємо стандартний резистор з опором 2,2 кОм.

Тоді при максимальному опорі потенціометра R_2=630 Ом, вихідна напруга з дільника становитиме:

$$U_{вих} = 9 \cdot \frac{630}{2200 + 630} = 2,004 \text{ В.}$$

Очевидно, що при повністю вимкненому потенціометрі $U_{вих}$=9В.

Помилка! Не можна створювати об'єкт із кодів полів редагування.

Рис. 5. Зовнішній вигляд потенціометра теплостійкого прецизійного, що було включено до електричної схеми дільника напруги та з'єднано гнучким валом з віссю стрілки динамометра випробувальної розривної машини УММ-5

Для роботи з АЦП використано спеціалізоване програмне забезпечення «Disco Application», яке містить драйвер пристрою і програму для візуалізації результатів вимірювання на персональному комп'ютері. Також, при роботі системи відбувається запис цифрових даних вимірювання у файли формату «txt», які можуть бути використані для подальшої обробки в додатках «Microsoft Office Exel 2007», «MathCad», «Graphical Analis» та інших, що підтримують формат «txt» [15]. Вікно програми для налаштувань і відображення даних вимірювань представлено на рис. 6.

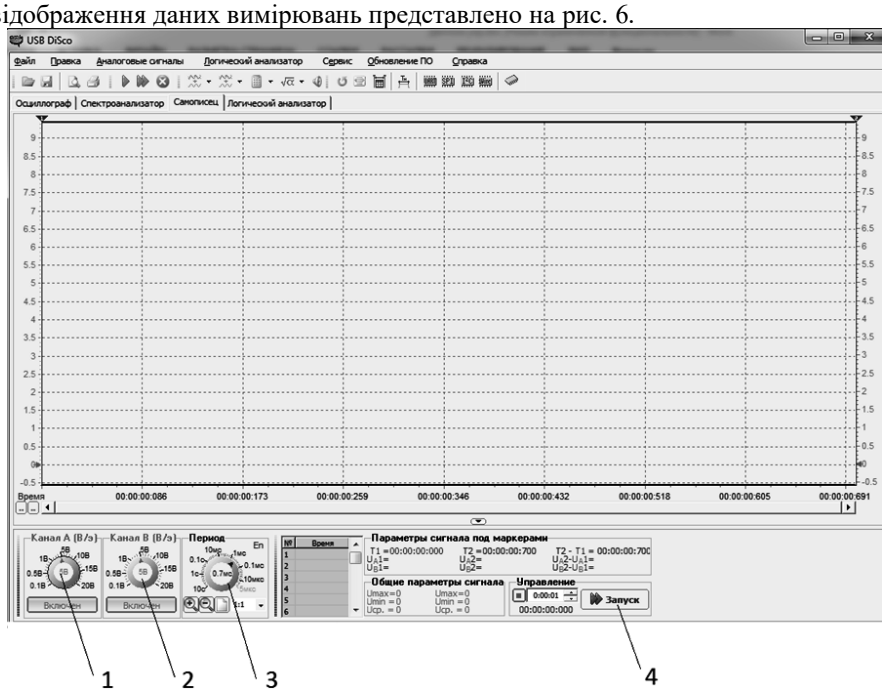
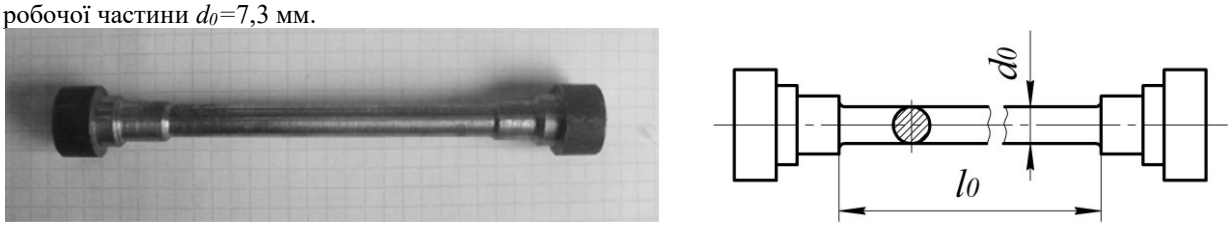


Рис. 6. Вікно програми для налаштувань і відображення даних (змінення вхідної напруги в часі):
1 – встановлення межі напруги каналу А; 2 – встановлення межі напруги каналу В; 3 – встановлення періоду відліку часу; 4 – запуск програми для запису даних

Після встановлення на випробувальну машину УММ-5 розробленої системи вимірювання зусилля було проведено випробування зразків конструкційних матеріалів [16, 17] на розтяг до моменту розриву [7-9].

На рис. 7. представлено зовнішній вигляд та ескіз випробувального зразка виготовленого із сталі Ст.3. Випробувальний зразок мав наступні розміри: початкова довжина робочої частини l_0=80 мм; діаметр робочої частини d_0=7,3 мм.



а б

Рис. 7. Зразок для випробування на розтяг: а – зовнішній вигляд; б – ескіз

В ході випробування зразка на розтяг до моменту розриву проводилось паралельне вимірювання зусилля і реєстрація даних за допомогою існуючої системи (стрілочний динамометр) і самописця (рис. 8, 9) та електронної системи на основі персонального комп'ютера (рис. 10).

В результаті випробувань отримано наступні результати: кінцева довжина робочої частини зразка $l_к$=94 мм; кінцевий діаметр утвореної шийки зразка $d_ш$=5,2 мм; максимальне зусилля за показниками динамометра F_{max}=2950 кГс = 29500 Н.

При цьому напруга на виході з датчика кута повороту стрілки динамометра зросла від 2 В (мінімальне зусилля) до 8 В (максимальне зусилля).

Отримані дані легко використати для масштабування і відображення діаграми розтягу зразка до моменту розриву в будь якому програмному середовищі, наприклад в «Microsoft Office Exel 2007».

а б

Рис. 8. Результат випробувань зразка на розтяг:
а – момент розриву зразка; б – фіксація стрілки динамометра в момент розриву зразка

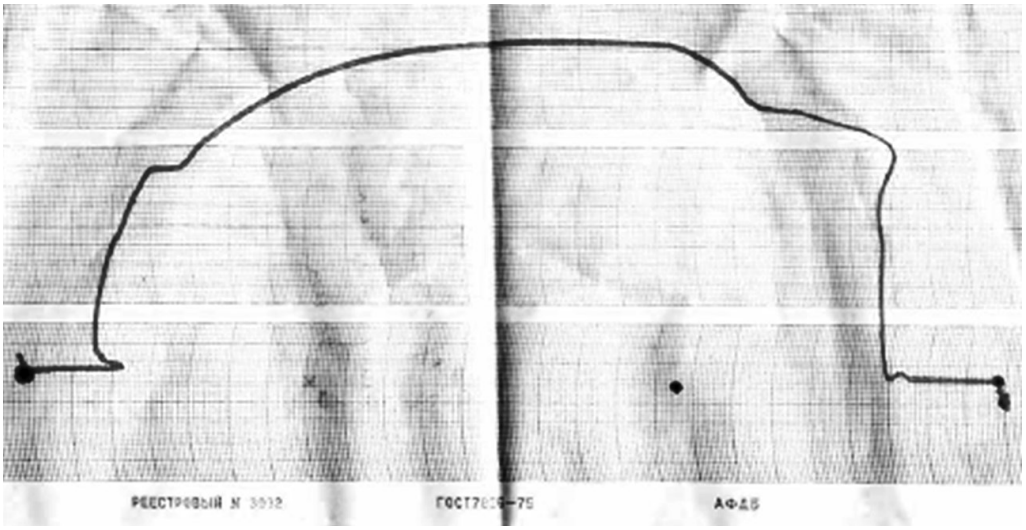


Рис. 9. Діаграма розтягу зразка до моменту розриву, отримана на самописці випробувальної машини УММ-5

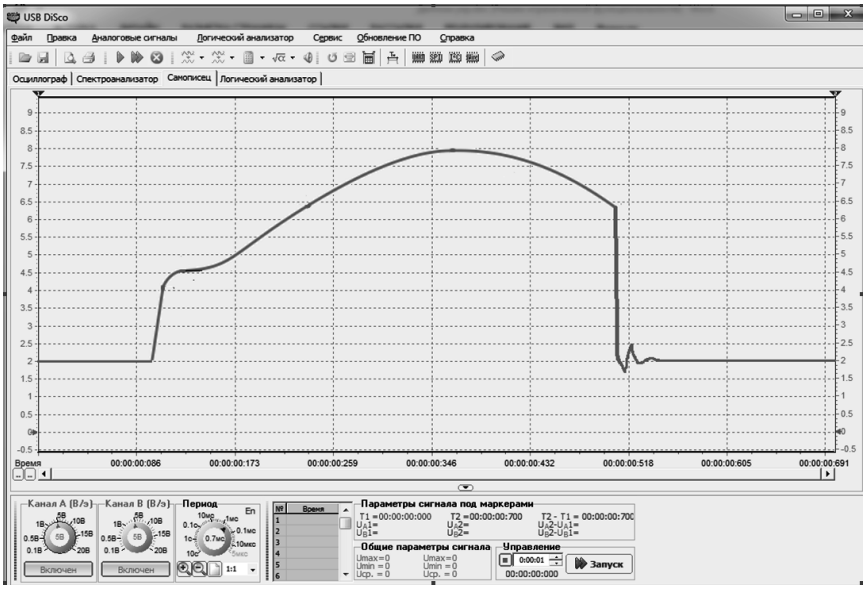


Рис. 10. Діаграма розтягу зразка до моменту розриву, отримана на комп'ютері за допомогою розробленої системи вимірювання

З рис. 9 та 10 видно, що якість діаграми отриманою за допомогою нової системи вимірювання значно краща. Це можна пояснити тим, що система механічного самописця вже достатньо зношена за багато років експлуатації, при її роботі мають місце уривчасті обертання валика і переміщення «пера», а також проковзування паперової стрічки.

Висновки

Аналітичний огляд сучасного обладнання для випробування конструкційних матеріалів показав тенденцію застосування в них електронних систем вимірювання та реєстрації даних з використанням персонального комп'ютера. Для вимірювання силових параметрів переважно використовують датчики з прямим перетворенням зусилля (деформації) в електричний сигнал.

Морально застарілі випробувальні машини мають системи механічного навантаження зразків, що в повній мірі відповідають сучасному рівню техніки. В таких машинах доцільно удосконалювати системи вимірювання і реєстрації даних.

Розроблена система комбінованого вимірювання зусиль вигідно поєднує переваги класичних механічних вимірювачів і електронні засоби реєстрації даних.

Удосконалення існуючих випробувальних машин за допомогою розробленої системи привабливе малими витратами на переобладнання і не вимагає значних змін їх конструкції.

Література

1. Ванкевич П.І. Лабораторний практикум з опору матеріалів : навчальний посібник / П.І. Ванкевич. – Львів : Магнолія 2006, 2019. – 224 с.

2. Вольмир А.С. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А.С. Вольмир. – М.: МАИ, 1997. – 352 с.

3. Цурпал И.А. Сопротивление материалов. Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П Барабан, В.М. Швайко. –К. : Вищ. шк., 1988. –247 с.

4. Афанасьев В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / В.А. Афанасьев, В.А. Марьин. – М. : Наука, 1975. –287 с.

5. Испытательные машины [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://asma.com.ua/content/ispytatelnye-mashiny

6. Машини випробувальні [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ukrintech.com.ua/ua/mashyny-vyprobuvalni/

7. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування при кімнатній температурі : ДСТУ EN 10002-1:2006 (EN 10002-1:2001, IDT). - [Чинний від 2008-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 34 с. – (Національний стандарт України).

8. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 5. Метод випробування за підвищених температур : ДСТУ EN 10002-5:2006 (EN 10002-5:1991, IDT). - [Чинний від 2018-03-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2018. – 26 с. – (Національний стандарт України).

9. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять : ДСТУ 2825-94. - [Чинний від 1996-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 1996. – 42 с. – (Національний стандарт України).

10. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютером IBM PC: Перевод с английского/ Под редакцией У. Томкинса и Дж. Уэбстера: - М.: Мир, 1992. – 592с.

11. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, Ю. В. Яцук ; ред.: Є. С. Поліщук, В. М. Ванько ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. — 580 с.

12. Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник / П. Д. Стухляк, О. В. Іванченко, А. В. Букетов, М. А. Долгов. — Херсон: Айлант, 2011. — 371 с.

13. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Э.Н. Асиновский, А.А. Ахмеджанов, М.А. Габидулин и др. ; под общ. ред. А.А. Ахмеджанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

14. Резисторы : справочник / В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, Н. Я. Патрусевич и др. ; под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Радио и связь, 1991. — 528 с.

15. Рубанка М. М. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки". - 2016. - № 1 (94). - С. 27-35.

16. Пахолюк А.П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : навч. посіб. / А. П. Пахолюк, О. А. Пахолюк. - Львів : Світ, 2005. – 172 с.

17. Василенко І.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. - Львів : Магнолія-2006, 2007. - 242 с.

References

1. Vankevych P.I. (2019). Laboratornyi praktykum z oporu materialiv [Laboratory practical work of strength of materials]. Lviv: Mahnoliia 2006 [in Ukrainian].

2. Vol'mir A.S. (1997). Laboratornyy praktikum po soprotivleniyu materialov [Laboratory practical work of strength of materials]. Moscow: MAI [in Russian].

3. Tsurpal I.A., Baraban N.P., Shvayko V.M. (1988). Soprotivlenie materialov. Laboratornye raboty [Strength of materials. Laboratory works]. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].

4. Afanas'yev V.A., Mar'in V.A. (1975). Laboratornyy praktikum po soprotivleniyu materialov [Laboratory practical work of strength of materials]. Moscow: Nauka [in Russian].

5. Ispytatel'nye mashiny [Testing machines] URL: https://asma.com.ua/content/ispytatelnye-mashiny (Last accessed: 28.11.2020) [in Russian].

6. Mashyny vyprobuvalni [Testing machines] URL: https://ukrintech.com.ua/ua/mashyny-vyprobuvalni/ (Last accessed: 28.11.2020) [in Ukrainian].

7. DSTU EN 10002-1:2006 (EN 10002-1:2001, IDT) Metalevi materialy. Vyprobuvannia na roztiah. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia pry kimnatnii temperaturi [Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2008. 34 p.

8. DSTU EN 10002-5:2006 (EN 10002-5:1991, IDT) Materialy metalevi. Vyprobuvannia na roztiah. Chastyna 5. Metod vyprobuvannia za pidvyshchenykh temperatur [Materials metallic. Tensile testing. Part 5. Method of testing at elevated temperature]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2018. 26 p.

9. DSTU 2825-94 Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat [Strength calculation and testing. Terms and definitions of principal conceptions]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 1996. 42 p.

10. Tomkins U., Uebster Dzh. (Eds.). (1992). Sopryazhenie datchikov i ustroystv vvoda dannykh s komp'yuterom IBM PC [Pairing sensors and data input devices with an IBM PC]. Moscow: Mir [in Russian].

11. Vanko V. M., Polishchuk Ye. S., Dorozhovets M. M., Yatsuk V. O., Yatsuk Yu. V. (2015). Vymiriuvalni peretvoriuvachi (sensory) [Measuring converters (sensors)]. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky [in Ukrainian].

12. Stukhliak P. D., Ivanchenko O. V., Buketov A. V., Dolhov M. A. (2011). Teoriia informatsii (informatsiino-vymiriuvalni systemy, pokhybky, identyfikatsiia) [Information theory (information-measuring systems, errors, identification)]. Kherson: Ailant [in Ukrainian].

13. Akhmedzhanov A.A. (Eds.). (1986). Vysokotochnye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy [High-precision angular displacement transducers]. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].

14. Chetvertkova I. I., Terekhova V. M. (Eds.). (1991). Rezistory [Resistors]. (2d ed.). Moscow: Radio i svyaz' [in Russian].

15. Rubanka M. M., Misiats V. P. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia dynamiky rotornoi drobarky dlia pererobky vidkhodiv lehkoi promyslovosti [Experimental researches of rotor crusher dynamics are for recycling of light industry wastes]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu - Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design, 1 (94). 27-35.

16. Pakholiuk A. P., Pakholiuk O. A. (2005). Osnovy materialoznavstva i konstruktsiini materialy [Fundamentals of materials science and construction materials]. Lviv: Svit [in Ukrainian].

17. Vasylenko I. I., Shyrokov V. V., Vasylenko Yu. I. (2007). Konstruktsiini ta elektrotekhnichni materialy [Construction and electrical materials]. Lviv: Mahnoliia 2006 [in Ukrainian].

Надійшла / Paper received : 04.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-101-106
УДК 621.787

М.М. КОСІЮК, С.А. КОСТЮК
Хмельницький національний університет

МАШИНА ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ЗОВНІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ

В статті розглянуті головні аспекти створення машини для підвищення працездатності деталей з сферичними та циліндричними поверхнями біполярною статико-імпульсною обробкою. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано машину для біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх поверхонь обертання, яка розширює технологічні можливості поверхнево-пластичного деформування та підвищує продуктивність і точність обробки, дозволяє керувати ступенем зміцнення, а також формувати поверхневий шар з геометрично визначеним мікрорельєфом.

Ключові слова: поверхневе пластичне деформування, статико-імпульсна обробка, удар, енергія, зміцнення, мікрорельєф.

M.M. KOSIYUK S.A. KOSTYUK
Khmelnitsky National University

MACHINE FOR STRENGTHENING EXTERNAL SURFACES OF ROTATION BY STATIC-PULSE TREATMENT

The article considers the main aspects of the machine to improve working capacity parts with sphericals and cylindricals surfaces bipolar static-pulse processing. The aim of the work is to generalize the results of research on the development of technology and equipment for strengthening cylindricals and incomplete sphericals surfaces of machine parts by surface plastic deformation.

The authors conducted a set of theoreticals and experimentals studies of static-pulse processing, which allows to strengthen the surface layer of parts in a combined static and dynamic force. To increase the productivity of the processing process and energy efficiency, a scheme of bipolar hardening. In this processing scheme, the workpiece in the form of a cylindricals or sphericals surface simultaneously receives two counter deformation waves, the energy of which is maximally used during the deformation of the surface layer of the workpiece. This intensifies the process of strengthening the surface layer of the workpiece and increases the energy efficiency of the strikes. A machine for bipolar static-pulse hardening of the outer surfaces of rotation of machine parts has been developed, the percussion devices of which have low metal consumption and provide the transfer of impact energy to the deformation zone with maximum efficiency. This is achieved by a rational ratio of the geometric parameters of the elements of the impact system. The machine increases productivity and accuracy of processing, allows to control depth of the strengthened layer, degree of strengthening and a microrelief of external surfaces of rotation of details of cars in the automatic mode according to the set algorithm.

The machine is made modular, which expands the technological capabilities of surface-plastic deformation and is important for its practical use.

Keywords: surface plastic deformation, static-pulse processing, impact, energy, hardening, microrelief.

Вступ. Одним із головних завдань сучасного машинобудування є забезпечення високої надійності техніки в період її експлуатації. Розробка заходів з підвищення працездатності, надійності, довговічності механізмів і машин є однією із прикладних проблем машинознавства, вирішення якої можливе завдяки підвищенню експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей машин комбінованими технологічними методами структурної модифікації і поверхневого зміцнення. Одним з найбільш ефективних способів управління параметрами якості поверхневого шару є обробка поверхневим пластичним деформуванням (ППД). Методи обробки ППД прості в реалізації, забезпечують формування низької шорсткості, заданої глибини і ступеня зміцнення, дрібнозернистої структури та інших показників якості оброблених деталей. Істотною перевагою цих методів є також висока продуктивність і економічність процесу. Крім того, вони не вимагають великих капіталовкладень. Ефективність ППД виключно висока для деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень, в корозійних середовищах, а також мають концентратори напружень. Однак можливість створення поверхневого шару з рівномірним зміцненням, а також формування ППД твердості оброблюваного матеріалу і залишкових напружень стиску до цього часу залишається не повністю реалізованою [1-3].

Розвиток нових прогресивних зміцнюючих технологій сприяє розробці сучасного обладнання та енергоефективних технологічних машин. Створення спеціального технологічного обладнання для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання та обґрунтування параметрів і режимів його роботи є актуальною задачею для різних галузей машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В передових розвинених країнах у всіх галузях промисловості все частіше застосовують методи ППД, різноманітні конструкції робочих інструментів і технологічного оснащення, виконано великий обсяг дослідних робіт по оцінці якості зміцнених деталей, їх надійності, довговічності і декоративних властивостей.

В наукових працях і довідковій літературі відмічена висока ефективність зміцнення поверхневого шару деталей машин ППД, які дозволяють поряд з істотним зниженням шорсткості і хвилястості створити поверхневий шар із технологічними напруженнями стиску і високою мікротвердістю, серйозно збільшити ресурс деталі [4 -7]. Однак, технологічні можливості більшості відомих видів ППД в управлінні параметрами якості поверхневого шару обмежені.

Статико-імпульсна обробка (СІО) є прогресивним методом обробки ППД, що дозволяє здійснювати зміцнення матеріалу в умовах комбінованого статичного і динамічного силового впливу. Технологія зміцнення СІО включає наступні етапи: попереднє статичне і подальше періодичне імпульсне навантаження інструменту. Внаслідок раціонального використання хвильових процесів СІО відрізняється високою енергетичною ефективністю. З літературних джерел відомо низку суттєвих переваг СІО, яка дозволяє варіювати в широких межах міцністю та зносостійкістю поверхневого шару, створювати сприятливі стискаючі залишкові напруження, а також формувати гетерогенну структуру робочих поверхонь деталей машин [8, 9].

Аналіз способів зміцнення поверхневого шару деталей машин методами ППД вказує на доцільність застосування СІО та проведення заходів з підвищення ефективності використання енергії удару, а також розроблення устаткування, для формування зміцненого поверхневого шару з одночасним формуванням геометрично визначеного мікрорельєфу. Відомо, що при навантаженні матеріалу ударами з однаковою енергією при використанні різних ударних систем, перенесена енергія в зону деформацією буде різною. Це пов'язано з хвильовими процесами, що протікають в ударній системі і залежать від геометричних параметрів елементів ударної системи, фізико-механічних властивостей їх матеріалів і швидкості співударяння [10].

Метою роботи є узагальнення результатів досліджень з розробки технології і обладнання для статико-імпульсного зміцнення циліндричних і неповних сферичних поверхонь деталей машин.

Виклад основного матеріалу досліджень. На основі аналізу науково-технічних джерел авторами проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, результати яких опубліковані в роботах [11–16]. При СІО застосовуються машини ударної дії зі статичним навантаженням інструмента, вектор дії якого збігається з напрямком дії ударного імпульсу, за рахунок чого досягається стабільність процесу зміцнення та зменшення втрат енергії удару (рис.1).

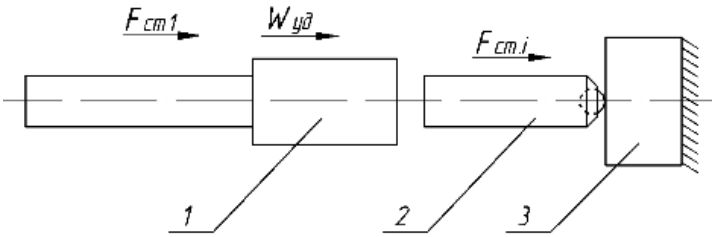


Рис. 1. Схема ударної системи
1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – заготовка.

Особливістю СІО є комбіноване статичне і динамічне навантаження матеріалу в зоні контакту інструмента і заготовки. В процесі СІО енергія удару подається в осередок деформації через проміжну ланку –інструмент з деформуючим елементом. Враховуючи особливості СІО ударні пристрої повинні забезпечувати передачу енергії удару в зону деформації з максимальним ККД, що досягається раціональним співвідношенням геометричних параметрів ударної системи (бойок-інструмент) і мати низьку металоємність.

Для дослідження параметрів ударного імпульсу в зоні деформації при поверхнево-пластичному зміцненні розроблено експериментально-вимірювальний комплекс оригінальної конструкції, який дозволяє моделювати процес одиничного ударного навантаження з різними початковими умовами, а також реєструвати параметри ударного імпульсу в зоні деформації.

Початкові умови навантаження та результати експериментальних досліджень при обробці заготовки, виготовленої із сталі 40Х, нормалізованої до твердості HV^{100} = 313 наведені в таблиці 2.

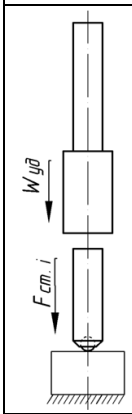
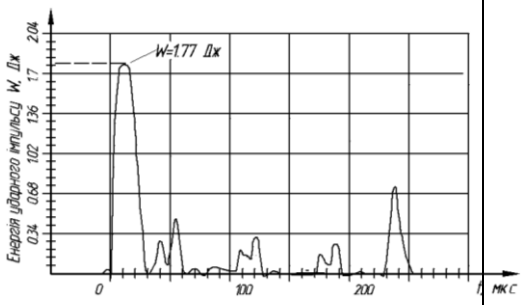
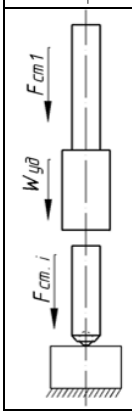
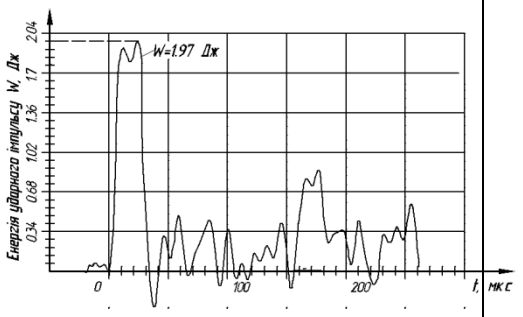
Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що в ударній системі формується пролонгований ударний імпульс, який складається з основної та додаткової (хвостової) частини. Установлено, що форма імпульсу формується за рахунок рекуперації відбитих хвиль, геометричних співвідношень елементів ударної системи та оптимального статичного навантаження бойка й інструмента.

Проведено дослідження коефіцієнта корисної дії ударної системи в залежності від геометричних та акустичних властивостей ударної системи та умов навантаження. Найкращий результат зафіксовано для схеми із статичним навантаженням бойка та інструмента і використання ступінчастої форми бойка при співвідношенні довжин інструмента з деформуючими елементами та бойка, як 1/3.Аналіз отриманих результатів показав, що ця схема при однаковій енергії удару забезпечує підвищення мікротвердості до 20% у порівняні з традиційною схемою обробки (без статичного навантаження), що вказує на зростання коефіцієнта використання енергії удару.

Для підвищення продуктивності процесу обробки та коефіцієнта використання енергії запропоновано схему біполярного зміцнення, зображеної на рис. 2. За такої схеми обробки, заготовка у вигляді циліндричної або сферичної поверхні, одночасно сприймає дві зустрічні деформаційні хвилі, енергія яких максимально використовується під час деформації поверхневого шару деталі. Це сприяє підвищенню коефіцієнта використання енергії удару бойків, інтенсифікує процес зміцнення поверхневого шару заготовки з одночасним формуванням геометрично визначеного мікрорельєфу.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень

Початкові умови		Результати експериментальних досліджень		
Схема навантаження	**Умови навантаження**	**Діаметр відбитка**	**Мікротвердість**	**Форма імпульсу**
	$W_{уд}$ = 2.35 Дж $F_{ст.i}$ = 40 Н; R_i = 1.5 мм	2.23	412	
	$W_{уд}$ = 2.35 Дж $F_{ст.i}$ = 40 Н; $F_{ст1}$ = 150 Н; R_i =1.5 мм	2.28	430	

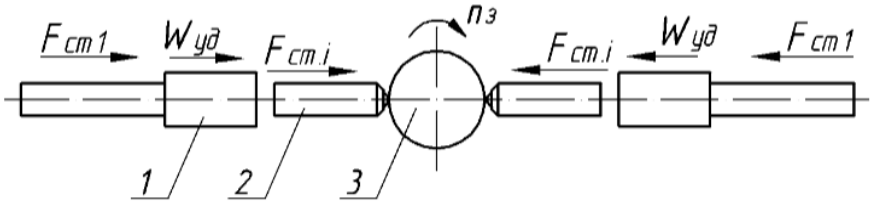


Рис. 2. Схема біполярного зміцнення
1 – бойок; 2 – деформуючий інструмент; 3 – заготовка

Проведені дослідження процесу біполярної СІО у програмному комплексі Abaqus. На рис. 3 наведено контурні графіки розподілу напружень при зміцнені зразків прямокутного та круглого січення для одного із кроків експерименту.

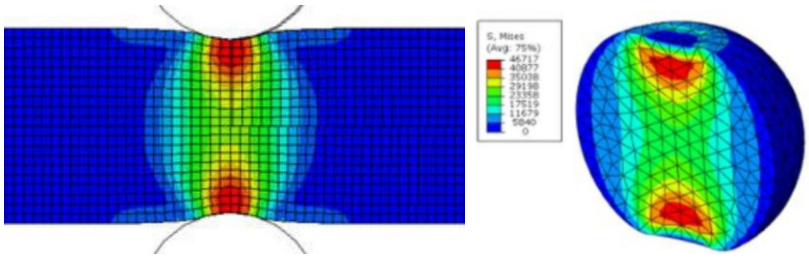


Рис. 3 – Контурний графік розподілу напружень під дією біполярного удару
а – зразок прямокутного січення; б – зразок сферичної форми

На рис. 4 – зображено модель ударної системи з статичним навантаженням інструмента з деформуючим елементом та комбінованим навантаженням бойка. Оброблювана поверхня заготовки 3 знаходиться у постійному контакті з статично навантаженими інструментами силою *Fст.i*. Статичне та динамічне навантаження бойка ударної системи інструментальної головки забезпечується за рахунок енергії пружно-деформованого тіла (стисненої пружини), параметри якої розраховуються так, щоб частина її потенціальної енергії перетворювалась в кінетичну енергію бойка $W_{уд}$, а інша витрачалась на статичне навантаження бойка *F ст.1* , і унеможливлювала його відскок.

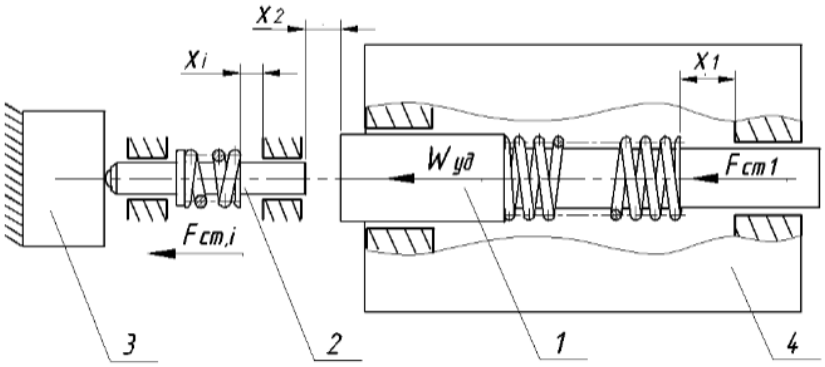


Рис. 4 . Модель ударної системи
1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – заготовка; 4 – генератор імпульсів;
x_1 – попереднє стиснення пружини бойка; x_2 – величина підйому бойка;
x_i – попереднє стиснення пружини інструмента

Авторами пропонується машина модульної конструкції для біполярного статико-імпульсного зміцнення деталей з циліндричними та сферичними поверхнями, загальний вигляд якої зображено на рис. 5. Машина для біполярного зміцнення сферичних та циліндричних поверхонь методом ППД містить станину 1 на напрямних 2 якої встановлено супорт поздовжніх переміщень 3, передню бабку 4, в якій встановлено привід (не показано) і пристосування для закріплення і обертання заготовки 5, задню бабку 6, яка встановлена на напрямні 7. Заготовка закріплюється у пристосуванні 5, обертання якого забезпечується приводом (не показано), розміщеним в передній бабці 4.

На супорт поздовжніх переміщень 3 встановлено поворотний стіл 8 з індивідуальним приводом (не показано). Дві інструментальні головки 9, закріплені у пристосуванні 10, встановленому на поворотному столі 8 таким чином, що осі інструментів з деформуючими елементами головок 9 і вісь обертання стола 8 находяться в одній площині, перпендикулярній площині, в якій знаходиться вісь обертання пристосування для закріплення заготовки 5. Пристосування 10 оснащено механізмом регулювання інструментальних головок (не показано) відносно осі обертання заготовки, закріпленої у пристосуванні 5. Інструментальні головки 9, оснащені синхронізованими ударними системами з електромагнітними (пневматичними або гідравлічними), або механічними, переважно кулачковими, генераторами імпульсів з безступінчастим приводом (не показано) і цифровою системою керування. Поздовжнє переміщення супорта 3 забезпечується механізмом подачі (не показано), оснащеного безступінчастим приводом з цифровою системою керування.

Модуль управління машиною, виконаний на основі комп'ютеризованої системи з числовим програмним керуванням, містить пульт керування 11 та панель індикації 12.

Робота машини здійснюється наступним чином. Інструментальні головки 9, які закріплені на поворотному столі 8 налагоджуються на заданий розмір за допомогою пристосування 10, оснащеного механізмом регулювання (не показано) інструментальних головок 9 відносно осі обертання пристосування 5 для закріплення заготовки.

При обробці зовнішніх циліндричних поверхонь заготовку закріплюють у пристосуванні 5 і задній бабці 6, яка служить для додаткової підтримки оброблюваної заготовки. Надають обертовий рух заготовці $V_з$ і поздовжню подачу $S_п$. Система керування машини у відповідності до алгоритму забезпечує біполярне статико-імпульсне зміцнення та формування геометрично визначеного мікрорельєфу поверхневого шару.

При обробці неповних сферичних поверхонь, заготовку, наприклад, автомобільного кульового пальця, закріплюють у пристосуванні 5, надають обертовий рух $Vз$ і поздовжню подачу $S_п$ для підведення сферичної поверхні заготовки до контакту з деформуючими елементами інструментів головок 9.

Кутова подача S_α забезпечується завдяки повороту стола 8 на кут α. Під дією ударної системи інструментальних головок 9 формується біполярне статико-імпульсне навантаження на сферичну поверхню заготовки. Система керування машини у відповідності до алгоритму, забезпечує оброблення всієї сферичної поверхні, нанесення геометрично визначеного мікрорельєфу з заданим коефіцієнтом перекриття пластичних відбитків.

Робота машини при зміцненні сферичних поверхонь ґрунтується на властивості сферичної поверхні, яка полягає у тому, що будь-який її перетин площиною, дає окружність. Таким чином, точність оброблення сферичної поверхні визначається кінематикою процесу, що дозволяє отримати неповні сферичні поверхні високої точності.

Запропонована машина розширює технологічні можливості поверхневого пластичного зміцнення завдяки використанню біполярного статико-імпульсного оброблення. Це підвищує продуктивність і точність обробки, дозволяє керувати глибиною зміцненого шару, ступенем зміцнення і мікрорельєфом зовнішніх поверхонь обертання деталей машин в автоматичному режимі у відповідності до заданого алгоритму.

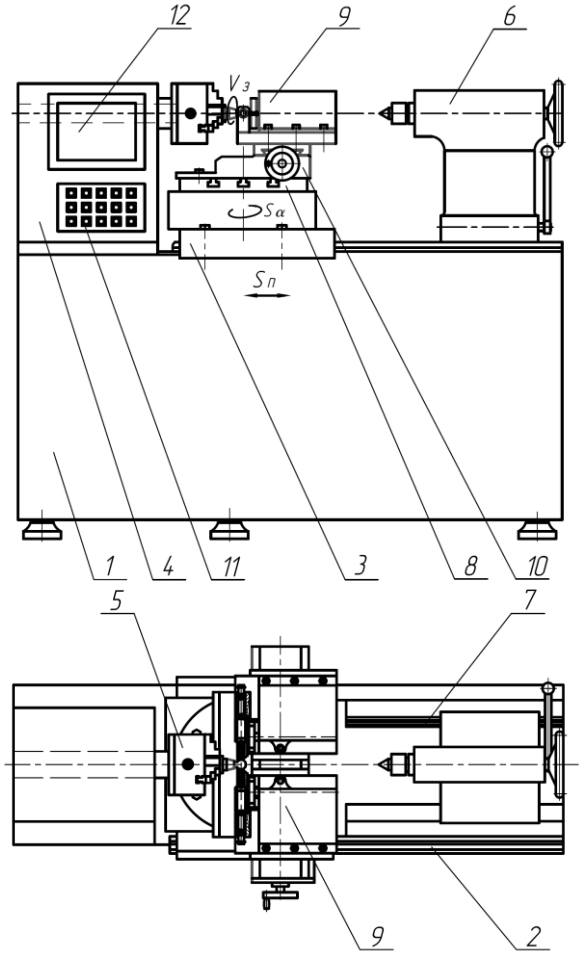


Рис. 6. Машина для біполярного статико-імпульсного зміцнення

Висновок. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено машину для біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх поверхонь обертання деталей машин, ударні пристрої якої мають низьку металоємність і забезпечують передачу енергії удару в зону деформації з максимальним ККД. Це досягається раціональним співвідношенням геометричних параметрів ударної системи. Машина підвищує продуктивність і точність обробки, дозволяє керувати глибиною зміцненого шару, ступенем зміцнення і мікрорельєфом зовнішніх поверхонь обертання деталей машин в автоматичному режимі у відповідності до заданого алгоритму. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машини, що важливо для її практичного використання.

Література

1. Овсеенко А. Н., Серебряков В. И., Гаек М. М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография. М.: Янус-К, 2003. - 296 с.

2. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

3. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования: монография / В.Ю. Блюменштейн, А.В. Киричек [и др.] ; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 404 с.

4. Зайдес, С.А. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. д.т.н., проф. С.А. Зайдеса. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ. – 2015. – 396 с.

5. Зайдес С.А. Современное состояние отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / С.А. Зайдес // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 10. – С. 28–34.

6. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2 т. Т. 1 / А. Г.Суслов, В. Ю. Блюменштейн, Р. В. Гуров [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. –М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.

7. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2 т. Т. 2 / А. Г.Суслов, А. П. Бабичев, А. В. Киричек [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М.:Машиностроение, 2014. – 444 с.

8. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

9. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / В.Н. Беляев, В.П. Иванов, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек и др. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – 403 с.

10. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. – М.: Наука, 1985. – 358 с.

11. Косіюк М.М. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням / М. М. Косіюк, С. А. Костюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2018. - № 4. - С. 49-56. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_4_10.

12. Косіюк М.М. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення / М. М. Косіюк, С. А. Костюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2018. - № 5. - С. 302-308. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_5_48.

13. Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірів зміцненням кульових пальців статико-імпульсною обробкою / М.М. Косіюк, С.А Костюк // WORLD SCIENCE DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws RS GlobalSp. z O.O., Warsaw, Poland, 2019, № 5(45) Vol.1, May 2019.

14. Патент 116148 Україна, МПК B23B5/00. Пристрій для зміцнення сферичних поверхонь / Косіюк М.М, Костюк С.А.; заявник і власник патенту Хмельницький національний університет; заявл. 21.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

15. Патент 132726Україна, МПК B24B 5/00. Пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою / Косіюк М.М., Костюк С.А.; заявники і власники патенту Косіюк М.М., Костюк С.А; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

16. Патент 132728 Україна, МПК F16C 11/06. Спосіб збільшення ресурсу сферичного шарніра / Косіюк М.М., Костюк С.А.; заявники і власники патенту Косіюк М.М., Костюк С.А; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

References

1. Ovseenko A. N., Serebryakov V. I., Gaek M. M. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva izdelii mashinostroeniya: monografiya. M.: Yanus-K, 2003. - 296 s.

2. Suslov A.G. Inzheneriya poverkhnosti detalei / A.G. Suslov, V.F. Bezyazychnyi, Yu.V. Panfilov i dr.; pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.

3. Tekhnologicheskie protsessy poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: monografiya / V.Yu. Blyumenshtein, A.V. Kirichek [i dr.] ; pod red. S.A. Zaidesa. – Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2007. – 404 s.

4. Zaides, S.A. Entsiklopediya poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya / pod red. d.t.n., prof. S.A. Zaidesa. – Irkutsk : Izd-vo IRNITU. – 2015. – 396 s.

5. Zaides S.A. Sovremennoe sostoyanie otdelochno-uprochnyayushchei obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem / S.A. Zaides // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – T. 20, № 10. – S. 28–34.

6. Tekhnologiia i instrumenty otdelochno-uprochniaiushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik: v 2 t. T. 1 / A. G.Suslov, V. Iu. Bliumenshtein, R. V. Gurov [i dr.]; pod obshch. red. A. G. Suslova. –M.: Mashinostroenie, 2014. – 480 s.

7. Tekhnologiia i instrumenty otdelochno-uprochniaiushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik: v 2 t. T. 2 / A. G.Suslov, A. P. Babichev, A. V. Kirichek [i dr.]; pod obshch. red. A. G. Suslova. – M.:Mashinostroenie, 2014. – 444 s.

8. Kirichek A.V. Tekhnologiia i oborudovanie statiko-impulsnoi obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem / A.V. Kirichek, D.L. Solovev, A.G. Lazutkin. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 288 s.

9. Effektivnye tekhnologii poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia i kombinirovannoi obrabotki / V.N. Beliaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isaev, A.V. Kirichek i dr. – M.: Izd. dom «Spektr», 2014. – 403 s.

10. Alimov O.D., Manzhosov V.K., Eremiants V.E. Udar. Rasprostranenie voln deformatsii v udarnykh sistemakh. – M.: Nauka, 1985. – 358 s.

11. Kosiiuk M.M. Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia enerhii udaru pry statyko-impulsnomu zmitsnenni poverkhnevym plastychnym deformuvanniam / M. M. Kosiiuk, S. A. Kostiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. - 2018. - № 4. - S. 49-56. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_4_10.

12. Kosiiuk M.M. Mekhanichnyi henerator impulsiv mashyny udarnoi dii dlia statyko-impulsnoho zmitsnennia / M. M. Kosiiuk, S. A. Kostiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. - 2018. - № 5. - S. 302-308. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_5_48.

13. Kosiiuk M.M. Pidvyshchennia dovhovichnosti sferychnykh sharniriv zmitsnenniam kulovykh paltsiv statyko-impulsnoiu obrobkoiu / M.M. Kosiiuk, S.A Kostiuk // WORLD SCIENCE DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws RS GlobalSp. z O.O., Warsaw, Poland, 2019, № 5(45) Vol.1, May 2019.

14. Patent 116148 Ukraina, MPK B23B5/00. Prystrii dlia zmitsnennia sferychnykh poverkhon / Kosiiuk M.M, Kostiuk S.A.; zaiavnyk i vlasnyk patentu Khmelnytskyi natsionalnyi universytet; zaiavl. 21.11.2016 ; opubl. 10.05.2017, Biul. № 9.

15. Patent 132726 Ukraina, MPK V24V 5/00. Prystrii dlia zmitsnennia nepovnykh sferychnykh poverkhon statyko-impulsnoiu obrobkoiu / Kosiiuk M.M., Kostiuk S.A.; zaiavnyky i vlasnyky patentu Kosiiuk M.M., Kostiuk S.A; zaiavl. 01.10.2018; opubl. 11.03.2019, Biul. № 5.

16. Patent 132728 Ukraina, MPK F16C 11/06. Sposib zbilshennia resursu sferychnoho sharnira / Kosiiuk M.M., Kostiuk S.A.; zaiavnyky i vlasnyky patentu Kosiiuk M.M., Kostiuk S.A; zaiavl. 01.10.2018; opubl. 11.03.2019, Biul. № 5.

Надійшла / Paper received : 07.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-107-115
УДК 621.793.7.001.5

М.С. АГЕЄВ, І.В. ГРИЦУК
Херсонська державна морська академія
А.В. РУТКОВСЬКИЙ
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України
А.Є. СОЛОВИХ, С.Є. КАТЕРИНИЧ
Центральноукраїнський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО ІОННОГО ВАКУУМНОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ У ПЛАЗМІ ПУЛЬСУЮЧОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

Більшість причин руйнування конструкційних елементів деталей машин і механізмів пов'язано з їх циклічною міцністю, а саме термомеханічною втомою, яка виражається у поступовому накопиченні пошкоджень у матеріалі в умовах одночасного впливу змінних навантажень, агресивного середовища та температури. Це призводить до виникнення тріщини від втоми, її розвитку та остаточного руйнування матеріалу. Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору термомеханічній втомі елементів конструкцій є використання ВТАППТР. Для аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом (ТП) ВТААПТР необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу.

Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору термомеханічній втомі елементів конструкцій є використання вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Однак широке використання технології ВТАППТР обмежено відсутністю визначення взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду та відсутністю рекомендацій по вибору оптимальних технологічних параметрів ВТАППТР, Ці обставини підтверджують необхідність подальшого вивчення процесу ВТАППТР.

Ключові слова: Вакуумне термоциклічне азотування, математична модель, технологічний процес, плазма, пульсуючий тліючий розряд.

M. AHIEIEV, I. GRITSUK
Kherson State Maritime Academy
A. RUTKOVSKIY
Institut problem micnosti imeni G.S. Pisarenka Nacional'na academia nauk Ukraini
A. SOLOVUCH, S. KATERINICH
Central Ukrainian National Technical University

RESEARCH OF THE VACUUM THERMOCYCLIC NITROGEN PROCESS IN A PLASMA PULSING GLOW DISCHARGE

An analysis of literature and recent studies, as well as a patent information search, showed the absence of general conclusions and recommendations on the selection of optimal technological parameters of vacuum thermocyclic nitriding in a pulsating glow discharge plasma (VTAPTTR) for the practical application of this technology. These circumstances confirm the relevance of optimizing the VTAPTTR technology and the need for further study.

Most of the causes of the destruction of structural elements of machine parts and mechanisms are associated with their cyclic strength, namely thermomechanical fatigue, which is expressed in the gradual accumulation of damage in the material under the conditions of simultaneous exposure to variable loads, aggressive environment and temperature. This leads to the appearance of a crack from fatigue, its development and the final destruction of the material. One of the important and promising directions in solving problems of increasing the thermomechanical fatigue resistance of structural elements is the use of VTAPTTR. To analyze the mechanism of phenomena and process control (TP) VTAAPTR, it is necessary to identify the relationship of factors that determine the course of the process, and present them in the form of a mathematical model.

Based on the theory of thermocyclic fatigue and the phenomenon of abnormal mass transfer under pulsed action, the Institute of Strength Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine developed a technology for accelerated nitriding in a glow discharge during cyclic temperature changes due to periodic supply of discharge voltage. The technology of ion-plasma thermocyclic nitriding (IPTA) is protected by patents of Ukraine and has no analogues in domestic and world practice. Using the VTAPTTR technology, various parts can be machined. For example, crankshafts, sleeves of internal combustion engines, gears of various modules, extruder screws, shafts, dies, molds, lengthy parts with holes, etc. Ion nitriding is used to process cast irons and various steels and alloys: structural and tool, maraging, corrosion-resistant, chromium and chromium-nickel steels of ferritic and austenitic class and the like. A promising new technology for hardening titanium, refractory metals - niobium, molybdenum.

One of the important and promising directions in solving problems of increasing the resistance to thermomechanical fatigue of structural elements is the use of vacuum thermocyclic nitriding in a plasma of a pulsating glow discharge. However, the widespread use of the VTAPTTR technology is limited by the lack of determining the relationship between the factors determining the process of vacuum thermocyclic nitriding in a pulsating glow discharge plasma and the lack of recommendations for choosing the optimal technological parameters of the VTAPTTR, these circumstances confirm the need for further study of the VTAPTTR process and its optimization.

The problem statement is to give an analysis of the phenomena in the process of vacuum thermocyclic nitriding in a plasma of a pulsating glow discharge, to determine the interconnections of factors that determine the course of the process of the STAPTTR and present them in the form of a mathematical model

As a result of the studies, the regularities of the influence of the HTAPPTR TP parameters on the microhardness, the diffusion saturation depth, the magnitude and distribution of residual stresses in the hardened layers of steel surfaces are established. Based on the use of expert assessment methods and the results of a series of screening experiments, optimization criteria (endurance limit and corrosion resistance) and controlled factors for mathematical modeling of the formation of strengthened ion-nitrated surface layers are determined. A

mathematical model of the TP of the formation of reinforced surfaces of the VTAPPTR TP according to the criteria of endurance and corrosion resistance is obtained.

An analysis of the studies showed that there are no general conclusions and recommendations on the selection of optimal technological parameters of the VTAPTTR that would be used for the practical application of this technology. These circumstances confirm the need for further study of the VTAPTTR technology and the feasibility of its optimization.

Keywords. Vacuum thermocyclic nitriding, mathematical model, technological process, plasma, pulsating glow discharge.

Актуальність теми дослідження. Аналіз літературних джерел та останніх досліджень, а також патентно-інформаційний пошук показав, що широке використання технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАППТР) обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАППТР та узагальнюючих висновків та рекомендацій по вибору технологічних параметрів цієї технології. Ці обставини підтверджують актуальність та необхідність дослідження процесу ВТАППТР.

Постановка проблеми. Більшість причин руйнування конструкційних елементів деталей машин і механізмів пов’язано з їх циклічною міцністю, а саме термомеханічною втомою, яка виражається у поступовому накопиченні пошкоджень у матеріалі в умовах одночасного впливу змінних навантажень, агресивного середовища та температури. Це призводить до виникнення тріщини від втоми, її розвитку та остаточного руйнування матеріалу.

Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору термомеханічній втомі елементів конструкцій є використання вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАППТР). Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом (ТП) вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТААПТР) необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі теорії термоциклічної втоми і явища аномального масопереносу при імпульсному впливі в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України розроблено технологію прискореного азотування в тліючому розряді при циклічному зміні температури за рахунок періодичної подачі напруги розряду. Технологія іонно-плазмового термоциклічного азотування захищена патентами України і не має аналогів у вітчизняній та світовій практиці [1-4]..

За допомогою технології ВТАППТР можлива обробка різноманітних деталей. Наприклад, колінчаті вали, гільзи двигунів внутрішнього згоряння, шестерні різних модулів, шнеки екструдерів, вали, штампи, прес-форми, довгомірні деталі з отворами та ін. Іонне азотування використовують для обробки чавунів і різноманітних сталей і сплавів: конструкційних і інструментальних, мартенситностаріючих, корозійностійких, хромистих і хромонікелевих сталей феритного і аустенітного класу тощо. Перспективна нова технологія для зміцнення титану, тугоплавких металів – ніобію, молібдену.

Нова технологія синтезована на основі трьох теорій, явищ та ефектів: теорії термовтоми; дискретно-імпульсному вводі енергії в теплотехнологіях; ефекту аномального масопереносу при дії імпульсних деформацій. Ефект аномального масопереносу забезпечується термічними напруженнями, що виникають за рахунок циклічних змін температури процесу. Теорія термічної втоми визначає умови отримання величин термічних напружень, достатніх для пришвидшення дифузії азоту в метал, але безпечних, щоб не пошкодити виріб. Дискретно-імпульсний ввід енергії забезпечує збільшення швидкості нагріву в 2…5 разів, що дозволяє збільшити термічні напруги та, відповідно, швидкість дифузії азоту [1-4]:.

Технологія прискореного азотування в тліючому розряді при циклічному зміні температури за рахунок періодичної подачі напруги розряду та ґрунтується на „трьох Китах” – ефективному рішенні комплексу взаємозв’язаних науково-методологічних проблем на межі термомеханіки, металофізики і теплофізики [1-4]:.

Технологію вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАППТР) слід розглядати як альтернативу класичній цементації з наступним гартуванням. Слід підкреслити, що американський стандарт ASTM A 706 обмежує і забороняє гартування з відпуском і фінішною механічною обробкою через технічні складності і підвищення вартості. Нова технологія не потребує фінішної механічної обробки [1, 2, 4]:.

Головна особливість технології ВТАППТР – використання ефекту аномального масопереносу азоту в поверхні деталі, що обробляється, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення та виключення тліючого розряду. Враховуючи пришвидшення масопереносу при термоциклюванні за рахунок виникнення термічних напружень було прийнято рішення розробити технологію хіміко-термічної обробки (ХТО) на базі класичної технології іонного азотування (ІА), яка в усьому світі працює в ізотермічному режимі. Технологія іонного азотування приваблива для вдосконалення тому, що світова тенденція полягає в скороченні тривалості ХТО, яка відноситься до найбільш енергоємних в машинобудуванні. Попередні спроби створити технологію термоциклічного іонного азотування (ТЦІА) дало позитивні результати. [1-4]:

Технологія ВТАППТР не використовує пічні пристрої. Іонне азотування в порівнянні з пічним має наступні переваги [1-4]:

- прискорює дифузійні процеси в 0,5-2 рази;
- дозволяє отримувати дифузійний шар регульованого складу і будови;
- характеризується незначними деформаціями виробів і високим класом чистоти поверхні;

- дає можливість азотувати корозійностійкі, жароміцні і мартенситно-старіючі сталі без додаткової депасивіруючої обробки;

- значно скорочує загальний час процесу за рахунок зменшення часу нагріву і охолодження садки;

- володіє великою економічністю, підвищує коефіцієнт використання електроенергії, скорочує витрату насичуючих газів;

- нетоксична і відповідає вимогам по захисту навколишнього середовища.

В світовій практиці азотування використовують аміак. Екологічна перевага технології ВТАППТР полягає у відмові від використання аміаку. Обробка відбувається тліючим розрядом у суміші аргону з азотом. Цим також усувається негативний вплив водню на серцевину деталі – водневе окрихчення та воднева корозія. Заміна класичного газового азотування в середовищі аміаку на технологію ВТАППТР в суміші азоту і аргону забезпечує скорочення тривалості обробки в 10 разів [1-4]:.

На відміну від класичних технологій ХТО технологія ВТАППТР не створює суцільного нагріву деталі, а забезпечує нагрів тільки поверхневого шару на глибину, необхідну для його зміцнення. Нагрівання відбувається за рахунок енергії тліючого розряду, тому немає необхідності використовувати печі [1-4].

Відмінність технології ВТАППТР від класичних технологій ХТО, які використовують ізотермічний режим: процес ХТО пришвидшено в 2…6 разів; за рахунок відсутності пічних пристроїв та наскрізного прогріву деталі, а також за рахунок пауз в електроживленні в півциклі охолодження деталі, циклічного характеру швидкісного дискретного енерговводу, прискорення дифузійних процесів скорочується в 2-3 рази час обробки, знижуються електровитрати та зменшуються енергоємність технології в 10 разів [1-4]:.

Таким чином, циклічний характер нагріву виробу дозволяє скоротити в 2…5 разів потрібну потужність джерел електричного живлення, що відносить технологію ВТАППТР до категорії енергозберігаючих. Технологія ВТАППТР підвищує твердість поверхні на 20%, не змінює форми і розміри деталі, а також шорсткість поверхні. Тому вона використовується як фінішна, без заключної механічної обробки. Це значно спрощує ТП виробництва при підвищенні довговічності та зносостійкості деталі в 4 рази, межі багатоциклової втоми – на 25% [1-4].

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору термомеханічній втомі елементів конструкцій є використання вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Однак широке використання технології ВТАППТР обмежено відсутністю визначення взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду та відсутністю рекомендацій по вибору технологічних параметрів ВТАППТР, Ці обставини підтверджують необхідність подальшого вивчення процесу ВТАППТР.

Метою статті є дати аналіз явищ в процесі вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду та визначити взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАППТР.

Виклад основного матеріалу. Обладнання для вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Для дослідження процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду використовувалася універсальна установка «ВІПА-1», розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України (рис.1) [1, 4].

Рис. 1. Установка для вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду

В установці використовують абсолютно екологічно чистий вакуумний процес, споживання електроенергії знижено в 4 і більше рази, тривалість процесу скорочена в 2 рази, відсутні поводки деталей (особливо довгомірних) та крихкість поверхневого шару.

Принцип роботи вакуумного устаткування для проведення ВТАППТР заснований на можливості іонізації газу, який подається в вакуумну камеру з наступним отриманням плазмо-хімічного з’єднання на поверхні деталі. Таким чином, на поверхні деталі отримуються тверді розчини азоту, при цьому службові властивості деталей (твердість, зносостійкість и т. д.), а також їх ресурс багаторазово підвищується.

Характеристика процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Процес ВТАППТР реалізується в дві стадії: очистка поверхні пед азотуванням і саме азотування. Технологічний процес ВТАППТР зводиться до слідуючих операцій [1-4]:

- обезжирювання деталей;

- установка деталей на пристрої, який одночасно повинен служити для місцевого захисту від азотування (покрити захисну поверхню металічним і діелектричним екраном). Зазор між деталлю і екраном допускається не більше 0,3-0,5 мм;

- установка в камеру печі деталей, термопари і свідка для контролю результатів азотування;

- очистка поверхні деталі катодним розпиленням протягом 15-40 хвилин під напругою 800-1000 В при тиску близько 133 Па. Катодне розпилення оброблюваної поверхні забезпечує нагрів деталей до 300-400°С;

- вихід на задану температуру азотування і витримка для отримання потрібної товщини азотованого шару (табл. 1, 2). Тиск в період насичення азотом підтримується в інтервалі 400-650 Па, а робоча напруга - 350-550 В;

- охолодження деталей в камері печі до 150-200°С при тискові 13,0-65 Па. продовжується 1,0-2,0 години.

Таблиця 1

Основні технологічні параметри процесу ВТАППТР деталей з різних сталей

Марка сталі	Температура, °С,	Газовий режим	Орієнтовна витримка, год., для отримання шару товщиною, мм					Твердість на поверхні, HV
			0,15-0,2	0,2-0,25	0,25-0,3	0,3-0,35	0,35-0,4	
40Х	520	1,2	4-5	7-9	9-12	12-15	15-18	500-550
40ХФА	520 520	1 2	4-5 4-5	6-8 6-8	9-12 8-10	15-18 12-15	- 15-18	- 510-560
18ХГТ	530 550	1,2 1,2	4-5 3-4	6-8 4-5	9-12 6-8	15-18 9-12	- 15-18	620-680 530-600
30Х3МФ	530 530	1 2	4-5 4-5	6-8 5-7	9-12 6-8	15-18 9-12	- 15-18	700-760 -
38Х2МЮА	550	1,2	4-5	5-7	7-9	9-12	15-18	900-950

При експериментальних дослідженнях використовували зразки зі сталі 40Х13 розміром 30х30 мм і товщиною 10 мм. Газовий режим азотування (табл. 2) забезпечує рівномірне зміцнення поверхонь зразків (рівномірну товщину дифузійного шару).

Технологічні параметри формування зміцнених шарів:

- температура термоциклювання - 550 ± 30 ° С,
- тиск - 25-150 Па,
- час обробки - 10 годин,
- співвідношення реакційних газів – 80% Ar + 20% N_2..

Таблиця 2

Основні технологічні параметри процесу ВТАППТР деталей з різних сталей

№ эксп.	Час дифузійного насичення, хв.	Тиск реакційного газу, Па	Склад реакційного газу	Температура газу, ^{0}К	Експлуатаційна температура, ^{0}К	Мікротвердість поверхневого шару, МПа	Товщина дифузійного шару, мкм
1	180	125	90%N_2 + 5%C_3H_8 + 5%Ar	773	788	3700	288
2	150	200	95%N_2+ 5%C_3H_8	873	725,5	10062	125
3	210	75	80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15%Ar	673	850,5	9955	286
4	150	175	80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15%Ar	873	819,2	8175	215
5	210	50	90%N, + 5%C,H_8 + 5%Ar	773	694,3	10590	142
6	180	100	90%N_2 + 5%C_3H_8 + 5%Ar	673	881,8	8270	253
7	240	225	95%N_2- 5%C_3H_8	773	756,8	8985	208
8	90	250	80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15%Ar	673	709,9	9100	267
9	180	125	95%N_2+ 5%C,H_8	873	834,9	8945	181
10	150	50	80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15% Ar	773	772,4	10235	179
11	210	175	90%N_2 + 5%C_3H_8 + 5% Ar	673	897,3	8144	312
12	150	100	95%N_2+ 5%C_3H_8	873	803,6	8335	228
13	210	225	80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15% Ar	673	678,6	10835	267
14	180	150	95%N_2+ 5%C_3H_8	773	866	8841	215
15	240	25	90%N_2 + 5%C_3H_8 + 5% Ar	873	741	9150	191
16	90	150	90% N_2 + 5%C_3H_8 + 5% Ar	673	780	8659	212

За допомогою запропонованої технології можлива обробка різноманітних деталей. Наприклад, колінчаті вали, гільзи двигунів внутрішнього згоряння, шестерні різних модулів, шнеки екструдерів, вали, штампи, прес-форми, довгомірні деталі з отворами та ін. Іонне азотування використовують для обробки чавунів і різноманітних сталей і сплавів: конструкційних і інструментальних, мартенситностаріючих, корозійностійких, хромистих і хромонікелевих сталей феритного і аустенітного класу тощо. Перспективна нова технологія для зміцнення титану, тугоплавких металів – ніобію, молібдену.

Аналіз літературних джерел та останніх досліджень, а також патентно-інформаційний пошук [1-4] показує що широке використання технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАППТР) обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАППТР та узагальнюючих висновків та рекомендацій по вибору технологічних параметрів цієї технології. Ці обставини підтверджують актуальність та необхідність дослідження процесу ВТАППТР.

Дослідження процесу ВТАЇ ІІ1ТР та властивостей іонноазотованих шарів. Значна кількість технологічних параметрів процесу ВТАЇ ІІ1ТР у сполученні із широкою номенклатурою матеріалів, із яких формують зміцнений поверхневий шар (ЗПШ), дають технологам широкий ряд альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність прийнятих рішень буде залежати від наявності необхідних критеріїв оцінки працездатності конструктивного матеріалу зі ЗПШ у заданих умовах експлуатації. Для успішної розробки технологічного процесу (ТП) ВТАЇ ІІ1ТР необхідно мати фізичний зміст і досить повно характеризувати процес вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду [1-7].

При зміцненні поверхонь конструктивних елементів широко використовується термін конструктивна або конструкційна міцність металів [8-10]. Поняття конструктивної міцності включає ряд параметрів або показників, що характеризують не тільки міцність конструктивних елементів, але і їх довговічність (ресурс), несучу здатність, а головне надійність. До показників конструкційної міцності елементів можна віднести міцність при різноманітних видах навантаження (розтягування, згинання, контактні навантаження і т. п.) при лінійному, двох і трьохвісному напруженому стані з різним характером прикладення навантаження (імпульсним, тривалим, стаціонарним або змінним), у тому числі програмним навантаженням, при низьких та високих температурах, в умовах впливу оточуючого середовища (корозійно-ерозійне середовище і т. п.) [8-10]. За допомогою використання ТП ВТАЇ ІІ1ТР, який впливає на якість поверхневого шару, можна керувати значеннями параметрів конструктивної міцності матеріалів. Оцінюючи умови роботи найбільш навантажених конструктивних елементів, встановлено одночасний вплив динамічних навантажень, підвищених температур та корозійного середовища.

Серед динамічних навантажень особливий інтерес представляють циклічні навантаження. При систематичному повторенні навантаження та розвантаження проходить накопичення дефектів структури матеріалу, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування від втоми. Установити максимальне циклічне навантаження, при якому матеріал не руйнується можна за допомогою термомеханічних високочастотних випробувань на втому, а саме у необхідності визначення значення межі витривалості зміцненого конструктивного матеріалу.

Корозійне пошкодження істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу. Таким чином, в якості поверхонь, зміцнених ВТАППТР доцільно досліджувати межу витривалості та корозійну стійкість, що характеризується питомим збільшенням маси.

Для дослідження процесу ВТАППТР було визначено параметри, що найбільше впливають на межу витривалості та корозійну стійкість зміцнених поверхневих шарів (ЗПШ): час дифузійного насичення, тиск та склад реакційного газу, температуру процесу дифузійного насичення, експлуатаційну температуру (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри ВТАППТР, що впливають на якість ЗПШ

№	Параметри	Значення
1	Час дифузійного насичення, хв.	90...240 (крок 30)
2	Тиск реакційного газу, Па	25...250 (крок 25)
3	Склад реакційного газу	1) 90%N_2 + 5%C_3H_8 + 5% Ar; 2) 95%N_2+ 5%C_3H_8; 3) 80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15% Ar
4	Температура газу, °К	673...873 (крок 100)
5	Експлуатаційна температура, °К	663...913

Необхідно зауважити, що значення таких параметрів як тиск та температура реакційного газу, що наведені у таблиці, протягом процесу ВТАППТР не є постійними: тиск реакційного газу змінюється періодично (з періодом 15...30 хв.), а температура - коливається у межах 25...35°С.

Дослідження мікротвердості поверхневих шарів після ВТАППТР виявили зростання її значень до 11250 МПа (табл. 4.) та поступове її зменшення до 4200 МПа на глибині до 310 мкм. Режими обробки представлені в таблиці 2 та 3. Із аналізу результатів, наведених в таблиці 4 видно, що проведення азотування у пульсуючому тліючому розряді сприяє збільшенню мікротвердості та глибини зміцнення оброблених поверхневих шарів. У будь-якому випадку такі значення мікротвердості зразків у 2,5...3,0 рази більші ніж

без впливу пульсуючого тліючого розряду та у 1,5 рази більшими, ніж у зразків після газового азотування (90%N_2+10%Ar; T=600°C; 1=4,0 год).

Таблиця 4

Мікротвердість ЗПШ зразка після ВТАППТР

№ режиму обробки	Мікротвердість поверхневого шару, МПа	
	без пульсуючого тліючого розряду	з пульсуючим тліючим розрядом
0	3100	3700
1	9032	10062
2	8164	9955
3	7414	8175
4	8614	10590
5	8047	8270
6	8089	8985
7	8154	9100
8	7534	8945
9	9111	10235
10	9904	8144
11	7040	8335
12	9898	10835
13	7950	8841
14	8061	9150
15	7769	8659
16	7179	8663

Аналіз даних в таблиці 4 дозволяє зробити висновок про існування деяких діапазонів температури азотування T (°C) та тиску реакційного газу P (Па), за яких мікротвердість поверхневих шарів сягає своїх максимальних значень: для температури азотування T (°C) цей діапазон знаходяться у межах 550...600 °C, для тиску газу P (Па) - у межах 200...230 Па. Зі збільшенням часу дифузійного насичення мікротвердість поверхневого шару зменшується, причому більш інтенсивно - після 2 годин обробки.

Стосовно впливу на мікротвердість складу реакційного газу встановлено, що максимальних значень вона набуває за умови використання суміші 90%N_2+ 5%C_3H_8 + 5%Ar, а мінімальних - за суміші 80%N_2 + 5%C_3H_8 + 15%Ar. Якість поверхневого шару визначається шорсткістю поверхні (табл.5), фізичним станом поверхневого шару конструкційного матеріалу та його напруженим станом. Дослідженнями якості поверхні зміцнених зразків (табл.. 5) виявлено незначне її погіршення після обробки з R_a= 0,25 мкм у неазотованих зразків до R_a = 0,29...0,39 мкм у азотованих. Режими обробки ВТАППТР для даних таблиць 5 та 6 представлені в таблиці 2.

Шляхом технології ВТАППТР можна отримати антикорозійну здатність таку як і при використанні гальванічних покриттів (табл. 6). У результаті проведення досліджень антикорозійної здатності іонно-азотованих сталевих зразків виявлено підвищення корозійної стійкості у 1,7...3,1 рази (табл. 6). Це являє собою особливий інтерес у випадку, коли переваги азотування спрямовані також на підвищення втомної міцності.

Для визначення опору втомі зміцнених ВТАППТР зразків досліджували не менше 10... 15 зразків. Кожний зразок доводили до руйнування, при цьому амплітуду коливання зразка й частоту навантаження на протязі всього часу дослідження майже до його руйнування підтримували постійною. База випробувань на втому $N=10^7$ циклів навантаження. При дослідженні на втому в умовах підвищених температур зразок перед навантаженням (тобто до початку випробувань) нагрівали до заданої температури і витримували в камері нагрівання додатково на протязі 30 хв. Момент початку руйнування зразка встановлювали за падінням резонансної частоти його коливань на 10... 15 Гц. На кількісні характеристики втоми здійснює вплив температура оточуючого середовища. З підвищенням температури випробування, починаючи з 500 °C, межа витривалості зменшується.

Активізуються дифузійні процеси на поверхні зразка під неадитивним впливом температури та зовнішнього середовища, що призводить до появи мікроскопічних поверхневих тріщин, які є початком руйнування від втоми. На опір втомі здійснює вплив як число циклів навантаження, так і час знаходження зразка при високих температурах в умовах циклічного навантаження.

ВТАППТР обмежує швидкість проходження дифузійних процесів, що значно впливає на підвищення межі витривалості. Завдяки ТП ВТАППТР вдалося підвищити межу витривалості зразків на

15...20% зі збільшенням кількості циклів до руйнування у мовах одночасної дії циклічних навантажень та температури.

Таблиця 5

Шорсткість поверхні ЗПШ зразків після ВТАППТР

№ Режиму обробки	Зразки оброблені вакуумним азотуванням, R_a, мкм	Зразки оброблені термоциклічним азотуванням, R_a, мкм
0	0,248	0,218
1	0,324	0,291
2	0,385	0,364
3	0,335	0,353
4	0,310	0,312
5	0,284	0,347
6	0,330	0,326
7	0,275	0,242
8	0,294	0,385
9	0,286	0,381
10	0,315	0,294
11	0,304	0,236
12	0,294	0,308
13	0,328	0,315
14	0,302	0,319
15	0,299	0,290
16	0,330	0,361

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що основними механізмами підвищення межі витривалості матеріалів внаслідок застосування ТП дифузійного насичення поверхні азотом у пульсуючому тліючому розряді у термоциклічному режимі є: зміцнення поверхневих шарів; створення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів; зміна хімічних та адгезійних властивостей поверхні.

Таблиця 6

Результати дослідження корозійної стійкості азотованих зразків

№ режиму обробки	Питоме збільшення маси зразка А т/т, після 10 годин випробувань	
	без пульсуючого тліючого розряду	з пульсуючим тліючим розрядом
0	0,58	0,40
1	0,17	0,12
2	0,22	0,18
3	0,19	0,17
4	0,17	0,15
5	0,20	0,18
6	0,20	0,19
7	0,21	0,18
8	0,19	0,16
9	0,16	0,14
10	0,18	0,18
11	0,21	0,20
12	0,16	0,14
13	0,19	0,16
14	0,18	0,15
15	0,20	0,20
16	0,21	0,18

Відносно невелика глибина проникнення іонів азоту не може розглядатися як фактор, що обмежує можливості цього різновиду обробки щодо підвищення межі витривалості, адже реалізація режимів обробки, пов'язана із модифікуванням поверхневих шарів субмікронної товщини. До того ж, експериментально встановлено, що підвищену межу витривалості можуть мати шари, товщина яких у декілька разів перевищує іонноазотовану область.

Зміцнення поверхневих шарів відбувається за наступними механізмами, вклад яких залежить від різних факторів (температури та марки матеріалу, що обробляється, параметрів ТП, тошо): утворення структур зі зміцнюючими фазами (нітридів, карбонітридів тощо), що викликають дисперсійне твердіння; деформаційне зміцнення при пластичній зміні форми іонноазотованого шару; зміцнення за рахунок утворення твердих розчинів, які створюють енергетичний бар'єр та утруднюють переміщення дислокацій; зменшення розмірів зерен, що призводить до збільшення площі міжзерних границь та перешкоджає руху дислокацій.

Як відомо, найбільшу небезпеку з точки зору забезпечення високого рівня межі витривалості матеріалів являють собою залишкові напруження розтягу. Вони сприяють розвитку приповерхневих тріщин, проникненню молекул зовнішнього середовища у витоки мікротріщин та прискорюють дифузію атомів домішків. В умовах багатоциклової втоми великого значення набувають залишкові напруження стиску, що виникають при дифузії азоту у поверхневі шари. У випадку дифузійного насичення поверхні азотом у тліючому розряді, упроваджений у матрицю атом азоту розсуває сусідні атоми, створюючи залишкові напруження стиску. Ці напруження ефективно зберігають поверхню від руйнування.

Іонно-азотуюча обробка значно впливає на хімічні та адгезійні властивості поверхні зміцнених матеріалів. Утворення хімічних сполук у сталях та сплавах за рахунок упровадження азоту або підвищення межі його концентрації змінює швидкість хімічних реакцій та кінетику зростання оксидних плівок, підвищує їх зчеплення з основою. Це призводить до зменшення інтенсивності утворення адгезійних вузлів схоплювання та сприяє покращенню механічних властивостей матеріалів.

Висновки. Аналіз літературних джерел та останніх досліджень показав, що широке використання технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАППТР) обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАППТР та узагальнюючих висновків та рекомендацій по вибору технологічних параметрів цієї технології.

На основі досліджень впливу напруженого стану і механічних властивостей на характеристики міцності встановлено механізм підвищення межі витривалості іонноазотованих поверхневих шарів. На підставі аналізу напружено-деформованого стану (НДС) створено можливість прогнозування характеристик циклічної міцності, що дозволяє в широких межах керувати режимами ТП ВТАППТР.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності впливу параметрів ТП ВТАП1ТР на мікротвердість, глибину дифузійного насичення, величину та розподіл залишкових напружень у зміцнених шарах сталевих поверхонь. Показано, що:

- для отримання максимальної мікротвердості поверхневого шару, що досягає 7600 МПа, тиск реакційного газу повинен знаходитися у межах 200...250 Па, час дифузійного насичення - 90... 150 хв.; температура процесу -- 500...600 °С;
- для отримання максимальної товщини дифузійного шару 150..305 мкм тиск реакційного газу повинен знаходитися у межах 200...250 Па, час дифузійного насичення – 180…240 хв.; температура процесу - 550.. .600 °С;
- в іонноазотованих шарах виникають залишкові напруження стиску порядку 445…950 МПа, рівень і розподіл яких залежать від технологічних параметрів процесу ВТАГШТР та від попередньої термообробки (ТО).

У результаті проведення досліджень властивостей поверхневих шарів зразків, зміцнених азотуванням, встановлено: що завдяки використанню ВТАППТР корозійна стійкість підвищується у 3,1 рази, а. межа витривалості сталевих конструкцій при температурах до 640 °С підвищується на 15...20%.

Література

1. Харченко В.В., Ляшенко Б.А., Куриат Р.И., Исаханов Г.В. Термоциклическое азотирование как синтез разработок НАН Украины. Соврем. проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: матер. 12-го Междун. науч.-техн. семинара (Свалява, 20-24 февраля 2012). Киев: АТМ Украины, 2012. – С.287-290.

2. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. О достоинствах технологии вакуумного азотирования. Оборудование и инструмент. 2005, №12. - С. 20-21.

3. Ляшенко Б.А., Хоцяновский А.О., Кумуржи А.Ю. Повышение прочности и износостойкости металлических изделий с помощью импульсной методики нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий Проблемы прочности. 2014, № 3.- С. 155-163.

4. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: пат. 78071 Україна С23С 8/06 опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

5. Дубровська Г.М. Системи сучасних технологій [Текст] / Г.М. Дубровська - Ч.: ЧІТІ, 2001 - 195 с.

6. В.В. Налимов Логические основания планирования эксперимента. [Текст] / В.В. Налимов, Т.И. Голикова - М.: Наука, 1976. - 128 с.

7. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. [Текст] / Л.З. Румшинский - М.: Наука, 1971. - 192 с.

8. Скляров, Н.М. Конструктивная прочность металлов. Металловедение и термическая обработка металлов. 1981, - №6. - С. 8-12.

9. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Часть 1 [Текст] / Г.С. Писаренко. - К.: Наукова думка, 1994. - 286 с.

10. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов [Текст] / Г.С. Писаренко. - К.: Вища школа, 1986. - 775 с.

References

1. Kharchenko V.V., Lyashenko B.A., Kuriat R.I., Isakhanov G.V. (2012).Termoziklicheskoe azotirovanie kak sintez razrabotok NAN Ukrainy.[Thermocyclic nitriding as a synthesis of developments of the NAS of Ukraine] Sovrem. problemy` proizvodstva i remonta v promy`shlennosti i na transporte: mater. 12-go Mezhdun. nauch.-tekhn. seminara [Lying. problems of production and repair in industry and transport: Mater. 12th Int. scientific and technical workshop] (Svalyava, February 20-24, 2012). Kiev: ATM of Ukraine, - S.287-290. [in Ukrainian]

2. Lyashenko B.A., Rutkovskij A.V. (2005). O dostoinstvakh tekhnologii vakuumnogo azotirovaniya. [On the advantages of vacuum nitriding technology] Oborudovanie i instrument. №12. - Pp. 20-21. [in Ukrainian].

3. Lyashenko B.A., Khoczyanovskij A.O., Kumurzhi A.Yu. (2014) Povy`shenie prochnosti i iznosostojkosti metallicheskikh izdelij s pomoshh`yu impul`snoj metodiki naneseniya ionno-plazmenny`kh nitridny`kh pokrytij. [Improving the strength and durability of metal products using a pulsed method of applying ion-plasma nitride coatings]. Problemy` prochnosti, № 3.- Pp. 155-163. [in Ukrainian].

4. Sposib poverkhnevogo zmicznennya stalevikh detalej ionno-plazmovim azotuvannyam u pul`suyuchomu tli`yuchomu rozryadi: [Method for surface steel parts of ion-plasma nitrogen in a pulsating flash discharge]: US Pat. 78071 Ukraine C23C 8/06 publ. 03/11/2013, Bull. No.5.

5. Dubrovs`ka G.M. (2001). Sistemi suchasnikh tekhnologi`j [Tekst] [Systems of modern technologies [Text] / GM. Dubrovskaya]. Ch.: ChI`TI`, 195 p. [in Ukrainian].

6. Nalimov V.V. (1976). Logicheskie osnovaniya planirovaniya e`ksperimenta. [Tekst]. [The logical basis for planning an experiment. [Text] / V.V. Nalimov, T.I. Golikova.] M.: Nauka, - 128 p. [in Russian].

7. Rumshinskij, L.Z. (1971). Matematicheskaya obrabotka rezul`tatov e`ksperimenta. [Tekst]. [Mathematical processing of experimental results. [Text] / L.Z. Rumshinskij]. M.: Nauka, - 192 p. [in Russian].

8. Sklyarov, N.M. (1981). Konstruktivnaya prochnost` metallov [Tekst] [Structural Strength of Metals]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. №6. P. 8-12. [in Russian].

9. Pisarenko G.S. (1994). Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu. Chast` 1 [Tekst]. [Resistance to deformation and destruction of materials. Part 1 [Text] / G.S. Pisarenko]. K.: Naukova dumka, - 286 p. [in Ukrainian].

10. Pisarenko G.S. (1986). Soprotivlenie materialov [Tekst] [Resistance of materials [Text] / G.S. Pisarenko]. K.: Vishha shkola, - 775 p. [in Ukrainian].

Надійшла / Paper received : 12.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-116-123
УДК 528.563

А. Г. ТКАЧУК, А. А. ГУМЕНЮК, М. В. БОГДАНОВСЬКИЙ
Державний університет «Житомирська політехніка»
О. М. БЕЗВЕСІЛЬНА
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ

У роботі приведено результати досліджень використання різних методів фільтрації вихідного сигналу чутливого елементу системи стабілізації озброєння. Встановлено, що альтернативним методом використання аналогових та цифрових фільтрів для системи стабілізації є застосування двоканального методу Петрова.
Ключові слова: стабілізація, точність, фільтр, двоканальність.

A. H. TKACHUK, A. A. HUMENIUK, M. V. BOGDANOVSKYI
[1]State University «Zhytomyr Polytechnic»
O. M. BEZVESILNA
NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»

RESEARCH OF METHODS OF FILTRATION OF THE OUTPUT SIGNAL OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE WEAPON STABILIZATION SYSTEM

The article considers the purpose of the weapon stabilization system, which allows you to keep the position of the gun in space, as well as to aim the weapon at the target regardless of the oscillations of the hull. Ways to increase the accuracy of stabilization are identified. The results of researches of use of various methods of filtering of an output signal of a sensitive element of system of stabilization of armament with use of analog and digital filters are resulted. Approximations of Butterworth, Chebyshev, and Cower polynomials are most commonly used. Filters obtained on the basis of these approximations are called by the appropriate names - Butterworth filter, Chebyshev filter and Cower filter. Elliptical filters and Bessel filters are also used. The influence of the change of the natural frequency of the sensitive element on its accuracy is also analyzed. It is established that the best method of filtering the output signal of the sensitive element of the weapon stabilization system is the two-channel Petrov method. Based on this method, a new three-coordinate piezoelectric sensing element has been developed. The piezoelectric element of one channel, which is installed by inertial mass on the piezoelectric plates, works on compression. An identical piezoelectric element of another channel, installed by the inertial mass under the piezoelectric plates, works in tension. The output electrical signals of the piezoelectric plates of both channels are summed in the adder. The resulting useful electrical signal will be proportional to twice the useful signal. Due to the use of an additional second measuring channel, there is no error in the output signal of the sensing element errors from the influence of vertical acceleration, from the residual non-identity of the structures of the same piezoelectric plates and masses, from the influence of temperature, humidity and ambient pressure.
Keywords: stabilization, accuracy, filter, dual channel.

Вступ

Однією з тенденцій розвитку систем управління вогнем сучасних бойових машин є створення більш ефективного стабілізатора озброєння з високими параметрами точності, що сприяє підвищенню військової потужності бойової машини і живучості системи «екіпаж-машина». У цьому зв'язку аналіз розвитку сучасних стабілізаторів озброєння є актуальним завданням [1-2].

Стабілізатор озброєння являє собою пристрій, що здійснює стабілізацію прицілювання зброї при переміщенні платформи, на якій цю зброю встановлено. Стабілізатор озброєння дозволяє зберігати незмінним положення гармати в просторі, а також здійснювати наведення озброєння на ціль незалежно від коливань корпусу ЛБТ, що виникають при русі по пересічній місцевості.

Аналіз сучасного стану вітчизняної та зарубіжної легкої броньованої техніки (ЛБТ) показує, що багато країн мають у своєму розпорядженні великою кількістю бойових машин з озброєнням, що не відповідає сучасним вимогам. Однак, ці машини характеризуються досить надійною ходовою частиною, що не виробила свого ресурсу. Заміна всього парку бронемашин на нові в даний час є неможливою навіть для самих економічно розвинених держав, тому найбільш прийнятним виходом є модернізація з використанням універсальних бойових модулів.

Українськими підприємствами розроблено велику кількість бойових модулів (в т.ч. стабілізаторів як компонентів цих модулів), які за основними показниками відповідають кращим світовим зразкам, а за багатьма характеристиками перевершують [1-2].

Досягнення високої точності систем стабілізації (СС) стало можливим сьогодні завдяки значному розвитку теорії гіроскопічних пристроїв працями найвизначніших вчених-математиків і механіків: А.Н. Крилова, Б.В. Булгакова, О.Ю. Ішлінського, Я.М. Ройтенберга, С.С. Рівкіна, В. А. Павлова, Е. Г. Попова, А. І. Лур'є, В.В. Солодовнікова та інших. Провідну роль мають і досягнення у галузі інерціальних систем навігації (ІНС) та чутливих елементів ІНС, висвітлених у наукових працях школи видатних вчених НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»: Одинцова А.А., Павловського М.А., Збруцького О.В.,

Самотокіна Б.Б., Карачуна В.В., Рижкова Л.М. та інших. Питання метрології, корисні при дослідженнях похибок чутливих елементів комплексів стабілізації, широко висвітлені у роботах Кваснікова В.П., Коломійця Л.В., Безвесільної О.М., Новицького П.В. та інших.

У роботі [3] побудовано схемотехнічні моделі та проведено моделювання п'єзоелектричних одноканальних перетворювачів з додатковими електричними коливальними контурами, які можуть бути використані в якості чутливого елемента стабілізатора озброєння. Використання таких моделей дозволяє за допомогою прикладних програм проводити оцінку характеристик і прогнозування параметрів і режимів роботи п'єзоелектричних перетворювачів.

У роботі [4] виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкої броньованої техніки. Розроблено структурну схему системи, компонентами якої є: пропорційно-диференціальний регулятор положення і нейромережевий регулятор швидкості. Виконано синтез нейрорегулятора з прогнозуванням.

У роботах [5-9] запропоновано в якості чутливого елементу системи стабілізації використовувати коріолісовий вібраційний гіроскоп. Проаналізовано склад і принцип роботи відомої системи ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу легкої броньованої техніки.

У статтях [10-11] розглянуто систему стабілізації з оптичним гіроскопом та приведено основні конструкційні розрахунки. Запропоновано програмні методи фільтрації вихідних сигналів акселерометрів та гравіметрів. Відсутнє порівняння із відомими аналогами.

У роботі [12] описано новий мобільний прилад для вимірювання динамічного вектора прискорення сили тяжіння і його градієнтів у підводному середовищі. Даний датчик може встановлюватись на озброєнні військових підводних човнів. Отримані результати досліджень можна використовувати і у проектуванні системи стабілізації озброєння легких броньованих машин, проте необхідно враховувати особливості наземної експлуатації системи.

Метою статті є дослідження використання різних методів фільтрації вихідних сигналів чутливих елементів системи стабілізації озброєння для підвищення її точності.

1. Застосування аналогових та цифрових фільтрів для фільтрації вихідного сигналу чутливого елемента стабілізатора озброєння

Амплітудно-частотні характеристики ідеальних фільтрів, як було показано на рис.4.1. мають різку границю між областями пропуску та затримки сигналів.

Фізична реалізація фільтрів з такого виду характеристиками неможлива, тому доводиться використовувати фільтри, характеристики яких, по можливості, наближені до ідеальних. Степінь близькості ідеальної і реальної характеристик фільтра прийнято оцінювати наступними параметрами ω_c - частота зрізу, яка визначає полосу пропуску зрізу, $\omega_з$ - границя області затухання, K_c - рівень АЧХ, що визначає нерівномірність передачі сигналу в полосі пропуску, K_c - рівень АЧХ, що визначає ослаблення в області затухання.

Фізичний зміст вказаних характеристик наглядно представлено на прикладі АЧХ ФНЧ, зображеному на рис.1 [13].

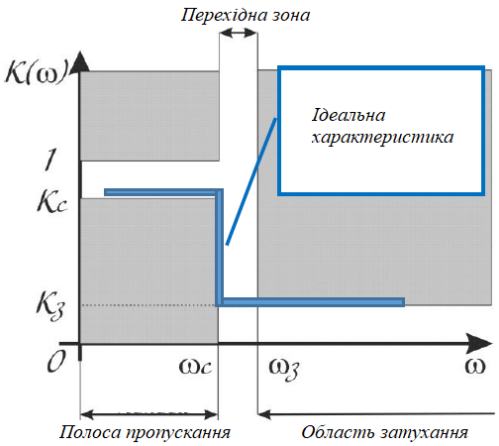


Рис. 1. АЧХ фільтра [13]

Поведінка АЧХ в області пропуску і області затухання, а саме допустимість пульсацій в даних областях являється додатковими умовами.

У загальному випадку можливі чотири основні варіанти поведінки АЧХ:

- монотонна;
- з пульсацією в полосі пропуску;
- з пульсацією в полосі затримки;
- з пульсацією в полосі пропуску і затухання.

На практиці проектування аналогових і цифрових фільтрів найчастіше використовуються наступні характеристики:

- *крутизна АЧХ* - термін, що використовується для опису нахилу амплітудно-частотної

характеристики в перехідній полосі, розташованій між полосами пропуску і затримки. Якщо АЧХ фільтр має крутизну -20 дБ/дек, ослаблення гармонічного сигналу зі збільшенням частоти в десять разів (на декаду) буде більше на 20 дБ;

- *нерівномірність АЧХ* в полосі пропуску - розмір флуктуації АХЧ від піка до піка в полосі пропуску;

- *ослаблення - зменшення* амплітуди гармонічного сигналу (дБ), після проходження через фільтр.

Ослаблення фільтра являє собою відношення амплітуди вихідного гармонічного сигналу на певній частоті, яке визначається таким чином:

$$L = 20\lg\frac{Xm_{вих}}{Xm_{вх}}(дБ) \tag{1}$$

Через використання логарифмічної залежності у випадку, якщо на заданій частоті амплітуда вихідного гармонічного сигналу фільтра менше амплітуди вхідного сигналу, то ослаблення виражається від'ємним числом.

- *відносне ослаблення* - ослаблення, виміряне по відношенню до найбільшого значення амплітуди. Найбільшому рівню сигналу зазвичай присвоюється опорний рівень 0 дБ, в результаті чого усі інші значення АЧХ виявляються від'ємними;

- *перехідна полоса* - діапазон частот, в якому АЧХ фільтр переходить від полоси пропуску до полоси затримки;

- *полоса затримки* - діапазон частот, в якому фільтр ослабляє сигнали;

- *полоса пропуску* - діапазон частот сигналу, в якому фільтр пропускає енергію сигналу на вихід з мінімальним ослабленням. Зазвичай визначається як діапазон частот, в якому АЧХ фільтр не виходить за межі зменшення потужності сигналу вдвічі, що відповідає зменшенню АЧХ на 3 дБ;

- *порядок фільтра* - число, що визначає найбільшу степінь чисельника або знаменника передатної функції фільтра;

- *пульсації* - флуктуації АЧХ в полосі пропуску або затримки;

- *центральна частота* (f_0 або ω_0) - частота, що лежить в центрі полоси пропуску фільтра;

- *частота зрізу фільтра* - вища (для ФНЧ) або нижча (для ФВЧ) частота, на якій АЧХ не виходить за межі пульсацій полоси пропуску фільтра.

У системі стабілізації важливим є мати можливість збереження форми сигналу, що накладає додаткові обмеження на вигляд фазочастотної характеристики ідеального фільтра.

Знайти потрібний вигляд ідеальної ФЧХ фізичного реалізованого фільтра доволі просто. Для того, щоб сигнал $u(t)$, що надходить на вхід фільтра, зберіг свою форму, вихідний сигнал фільтра $y(t)$ повинен бути пов'язаний з ним співвідношенням

$$y(t) = k\cdot u\cdot(t - t_0), \tag{2}$$

де $k = const$ - масштабний коефіцієнт, $t_0 = const$ - час затримки появи вихідного сигналу по відношенню до вхідного сигналу.

Тобто єдина зміна сигналу, що допускається в такому фільтрі - це затримка в часі і масштабування по амплітуді.

Очевидно, що передатна функція вказаного фільтра має виглядати таким чином:

$$W(s) = ke^{-st0}, \tag{3}$$

що приводить до ФЧХ у вигляді:

$$\varphi(\omega) = -\omega t_0 \tag{4}$$

тобто дана характеристика повинна бути лінійною відносно частоти [13]. Якщо ФЧХ не буде лінійною однорідною функцією кругової частоти , то різні гармонійні складові сигналу будуть зміщені фільтром на різні інтервали часу, що приведе до викривлення форми сигналу, що містить більше однієї гармонійної складової. Чим ближче ФЧХ фільтра до лінійної однорідної функції, тим викривлення будуть менші ніж викривлення форми сигналу.

Для систем стабілізації доречним було б також проаналізувати можливості використання саме фільтрів нижніх частот для чутливих елементів (гіроскопів, акселерометрів). Властивості таких фільтрів сильно залежать від того, яка саме математична функція обрана для апроксимації частотної характеристики ідеального фільтра, тобто від того якими поліномами описуються їх передатні функції. Саме вибір виду апроксимуючого полінома (а, отже, відповідно і розташування нулів і полюсів на комплексній площині) визначають вид амплітудно-частотних характеристик в полосі пропуску, в перехідній полосі і в полосі затримки.

Найчастіше використовуються апроксимації поліномами Баттерворта, Чебишева і Кауера. Фільтри, отримані на основі даних апроксимацій називають відповідними іменами – фільтр Баттерворта, фільтр Чебишева і фільтр Кауера. Також застосовуються еліптичні фільтри і фільтри Бесселя [13].

Фільтри Баттерворта характеризуються монотонною і найбільш плоскою АЧХ в полосі пропуску, при цьому падіння характеристики відбувається недостатньо різко.

Фільтри Чебишева відрізняються різким спадом АЧХ в перехідній полосі, але в полосі пропуску ці характеристики не являються монотонними (плоскими). На практиці застосовуються два види фільтрів Чебишева, що отримали назви фільтрів першого і другого роду.

Фільтри Бесселя характеризуються ФЧХ близькими до ідеальних, що відповідають однорідній лінійній функції від частоти. Цей тип фільтрів практично не викривляє форму вхідного сигналу, але їх АЧХ в перехідній полосі, ще більш пологі, навіть в порівнянні з фільтрами Баттерворта.

2. Метод фільтрації на основі підбору власної частоти чутливого елементу

Результати вимірювань, отримані за допомогою різних чутливих елементів (струнного, ємнісного, двогіроскопного, п'єзоелектричного) стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки, містять похибки вимірювань. Ці похибки викликані тим, що чутливий елемент вимірює проекцію сукупності сигналів на власну вісь чутливості: корисного сигналу та сигналу перешкоди (який у декілька разів перевищує корисний сигнал) [1, 14].

Розглянемо вирішення даної проблеми фільтрації вихідного сигналу на прикладі п'єзоелектричного гравіметра (ПГ) [14-15].

Рівняння руху автоматизованої гравіметричної системи для визначення аномалії прискорення сили тяжіння Δg має вигляд [14]:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r}\left\{1 - 2e\cdot\left[1 - 2\cos^2\varphi\cdot(1 - \frac{\sin^2 k}{2})\right]\right\} + 2\omega_3 v \sin k\cos\varphi - \\ - 2\dot{h}\frac{e}{r}v\cos k\sin 2\varphi + 2\frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h\cos^2\varphi - \ddot{h} - \gamma_0. \quad (5)$$

де f_z − вихідний сигнал ПГ; g_z – прискорення сили тяжіння вздовж осі чутливості ПГ; v – швидкість об'єкта; r – радіус місцезнаходження об'єкта; e – стиск еліпсоїда; φ – географічна широта; k – курс; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота літака над еліпсоїдом; $\dot{h}$ − вертикальна швидкість; $\ddot{h}$ − вертикальне прискорення; γ_0 – довідкове значення прискорення сили тяжіння.

Вихідний сигнал гравіметра АГС після обчислення і введення всіх поправок можна записати у вигляді [1, 14]:

$$T = f_z = g_z + \sigma_h, \quad (6)$$

де $\sigma_{\ddot{h}}$ – похибка від впливу вертикального прискорення об'єкта.

У роботі [14] отримано аналітичні вирази спектральних щільностей корисного сигналу та вертикального прискорення об'єкта та побудовано їх графіки. Із цих графіків видно, що при частотах, менших за 0,1 рад/с, система літак-автопілот суттєво зменшує ефекти впливу вертикального прискорення; при частотах понад 0,1 рад/с спектральна густина вертикального прискорення прямує до нескінченності. Тому необхідно забезпечити процес фільтрації вихідного сигналу ПГ із частотою 0,1 рад/с. Найпоширенішим методом конструктивної реалізації даного процесу у відомих гравіметрів є використання низькочастотних фільтрів із частотою зрізу 0,1 рад/с. Однак, у тих умовах, у яких передбачена експлуатація ПГ, робота електронних компонентів фільтра стає нестабільною, цим змінюючи його частоту зрізу. У кінцевому результаті фільтр починає пропускати завади на вихід ПГ або не пропускати частину корисного сигналу взагалі. Тому наявність фільтра низьких частот, як окремого блока у складі гравіметра, суттєво зменшує, у першу чергу, надійність приладу та точність.

Запропоновано новий спосіб фільтрації вихідного сигналу ПГ (чутливого елементаа системи стабілізації) за рахунок використання п'єзопакета, частота власних коливань якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод – 0,1 рад/с.

Тому, завдяки властивостям п'єзопакета, для вихідного сигналу можна записати співвідношення [14]:

$$T(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(t-\tau)T_0(\tau)d\tau, \quad (7)$$

де $w(t-\tau)$ – вагова функція фільтрації, що реалізується п'єзопакетом; $\tau = 2\pi k$ (k= 1,2…) – інтервал часу обчислень пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра. При цьому:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(j\omega)e^{j\omega\tau}d\omega = 2\omega_0\left[\frac{\sin\omega_0}{\omega_0 t}\right], \quad (8)$$

де ω_0 – власна частота гравіметра; $W(j\omega)$ – функція передачі фільтрації, що визначається на основі спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння і завад.

Саме за допомогою низькочастотної фільтрації з частотою зрізу 0,1 рад/с, можна відокремлювати g від $\ddot{h}$ із точністю 1 мГал. Отже, частота власних коливань ПГ дорівнює:

Однак, даний спосіб фільтрації передбачає значне збільшення товщини п'єзопакету (габаритів чутливого елементу), тому доцільно розглянути інший спосіб досягнення власної частоти ПГ величиною 0.1 рад/с з уникненням потовщення.

Існує залежність частоти вимірювання від постійної часу, яка має вигляд:

$$\omega_0 >> \frac{1}{\tau};\ \tau = R_\Sigma C_\Sigma, \tag{9}$$

де R_Σ – сумарний опір витоку, утворений поверхневим та об'ємним опорами ПГ і вхідним опором вимірювального кола; C_Σ – сумарна ємність між гранями пластин ПГ та вхідного кола.

Оскільки власна частота ПГ $\omega_0 = 0{,}1$ рад/с, тоді маємо:

$$0{,}1 >> \frac{1}{\tau} \Rightarrow \tau >> 10c. \tag{10}$$

У реальних умовах ПГ вмикають у спеціальні вимірювальні схеми, а тому паралельно його власній ємності $C_{ПЕ}$ будуть увімкнені ємності вхідного кола операційного підсилювача C_{BX} та з'єднувального кабелю C_K. Аналогічна ситуація відбувається і з опором ПГ $R_{ПЕ}$, до якого ще додається опір ізоляції кабелю R_K та вхідний опір операційного підсилювача R_{BX}. Тому значення сумарного опору та ємності має наступний вигляд:

$$R_\Sigma = R_{ПЕ} + R_K + R_{BX}; \tag{11}$$

$$C_\Sigma = C_{ПЕ} + C_K + C_{BX}. \tag{12}$$

Із формули (10) видно, що чим більше τ, тим менша власна частота ПГ, однак тим повільніший стає процес розряду п'єзоелементу. Через інтервал часу $5\tau=5\ R_\Sigma C_\Sigma$ напруга та струм у колі зменшиться приблизно 1% від початкового значення, і процес розряду п'єзоелементу можна вважати завершеним.

3. Метод двоканальності Петрова

Як бачимо, точність стабілізації сильно залежить від точності чутливих елементів системи стабілізації. Вихідні сигнали цих чутливих елементів містять значні похибки, описані в [1]. Найпоширенішим методом їх ліквідації є використання фільтрів нижніх частот. Проте існують й інші методи фільтрації, які уникають необхідність використання фільтрів як окремих блоків конструкції системи стабілізації озброєння. Одним із них є метод двоканальності Петрова [17].

Одне з найголовніших питань теорії регулювання за збуренням є питання реалізації умов інваріантності. Якщо застосування принципу регулювання за збуренням дає ряд суттєвих переваг і дозволяє побудувати системи автоматичного регулювання, що характеризуються високою динамічною точністю і базуються на виконанні умов інваріантності, то головною задачею залишається задача реалізації цих умов в реальних системах автоматичного регулювання. Найбільш суттєві результати у вирішенні даної задачі отримані в роботах Б.Н. Петрова [17].

Постановка задачі реалізації умов інваріантності полягає в наступному: вказати загальний «критерій, котрий дозволив би визначити необхідні умови можливості застосування умов інваріантності, як одного із методів розрахунку динамічних систем і виключати ті системи, для яких застосування даних умов є недопустимим, тобто може призвести до фізично нездійсненних результатів».

Вирішення вказаної задачі сформульовано Б.Н. Петровим у виді наступного критерію:

«Необхідною (але не достатньою) ознакою можливості застосування умов інваріантності при розрахунку різних динамічних систем являється обов'язкова наявність в схемі, по меншій мірі, двох каналів впливу між точками прикладання сили збурення і виміру потрібної нам величини».

На ряді конкретних прикладів Б.Н. Петровим проілюстровано випадки систем, при розрахунку яких можливе застосування умов інваріантності, а також вказано протилежний клас систем. Одним з таких прикладів, являється система, що описується рівнянням [17]:

$$\begin{gathered} a_{11}x_1 + \ldots + a_{13}x_3 = f_1(t); \\ a_{31}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = 0; \\ a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = 0 \end{gathered} \tag{13}$$

і допускає у випадку, якщо вона впорядкована, представити її в структурній формі (рис. 2).

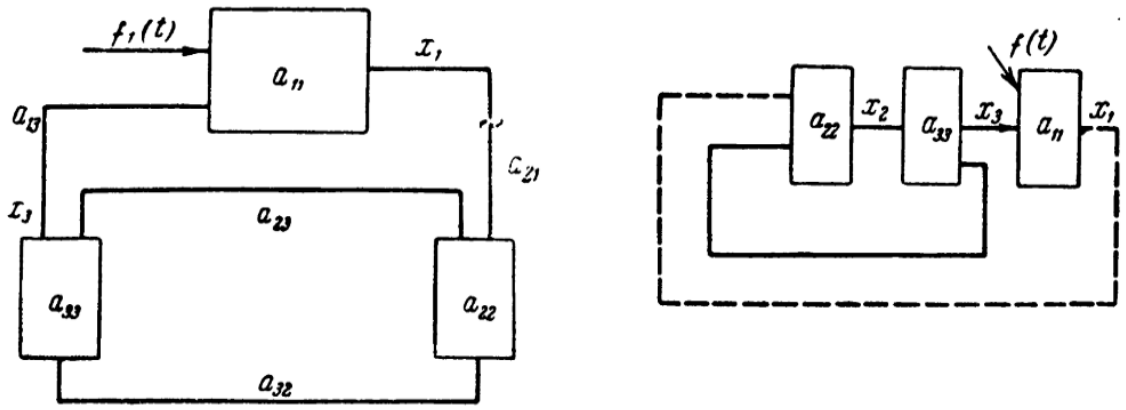


Рис. 2. Структурні перетворення схем

Візьмемо ту саму систему диференційних рівнянь, але поміняємо їх місцями, тобто напишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + a_{33}x_3 &= 0; \\ a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= 0; \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_3 + a_{13}x_3 &= f_1(t); \end{aligned} \tag{14}$$

Структурна схема цієї системи у випадку її впорядкованості подана на рис.3.

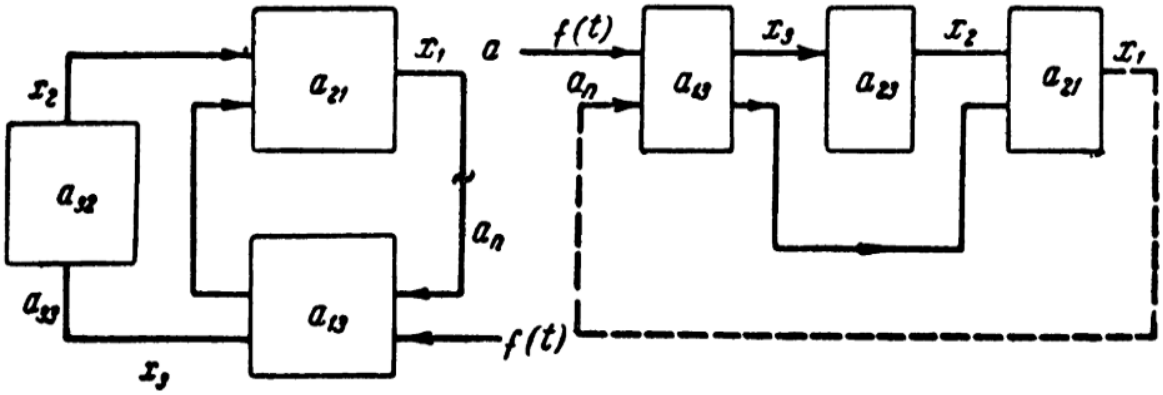


Рис. 3. Приклад структурного перетворення схеми

Перша система має лише один канал взаємодії між точкою прикладання збурення f(t) та $x_1(t)$, а інша – два канали для взаємодії між f(t) та $x_1(t)$.

Згідно критерію Б.Н. Петрова перша система являється такою системою, для якої умови інваріантності неприйнятні, і навпаки, у випадку другої системи (рис.3) умови інваріантності мають фізичну реалізацію.

Слід також вказати на те, що вказаний критерій дійсний для класу автономних систем, комбінованих систем, мостових схем і тд. [17].

Підвищення точності вимірювання у новому чутливому елементі стабілізатора озброєння забезпечується за рахунок того, що створено другий канал вимірювання. Для цього чутливий п'єзоелектричний елемент виконано з двома каналами [16]. П'єзоелемент одного каналу, що встановлений інерційною масою на п'єзопластинах, працює на стиснення. Ідентичний йому п'єзоелемент іншого каналу, що встановлений інерційною масою під п'єзопластинами, працює на розтяг. Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі. Результуючий корисний електричний сигнал буде пропорційним подвоєному корисному сигналу.

Отже, завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному сигналі чутливого елемента сигналів похибок від впливу вертикального прискорення, від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (тобто інструментальних похибок), які можуть бути значними [16].

Висновки. У роботі приведено результати досліджень використання різних методів фільтрації вихідного сигналу чутливого елементу системи стабілізації озброєння. Встановлено, що альтернативним методом використання аналогових та цифрових фільтрів для системи стабілізації є застосування двоканального методу Петрова. Описано використання даного методу на основі прецизійного п'єзоелектричного чутливого елемента.

Література

1. Безвесільна О.М. Система захисту приладового комплексу від ударних та вібраційних впливів: монографія з грифом НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – 2018, Київ: НПО «Пріоритети». – 170 с.

2. Тарасенко А. Бронетанковая техника Украины: итоги, потенциал, перспективы / А. Тарасенко // Бронетанковая техника Украины. – 2008. – №4. – С. 29–35 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://militaryarticle.ru/tekhnika-i-vooruzhenie/2008/11678-bronetankovaja-tehnika-ukrainy-2. Accessed 06 Mar 2020

3. Базіло К.В. Схемотехнічне моделювання п'єзоелектричного перетворювача з додатковими коливальними контурами / К.В. Базіло // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – №6. – С.166-169.

4. Кузнєцов Б.І. Система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейромережевим регулятором / Б.І. Кузнєцов, Т.Ю. Василець, О.О. Варфоломієв // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – №1(13). – Р.112-116.

5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // Електроніка та системи управління. – №4(34). – 2012р. – С. 56-63.

6. Guerard J. Quartz structures for Coriolis Vibrating Gyroscopes / Guerard J., Janiaud D., Taibi R., Levy R. // Phys. & Instrum. Dept., ONERA, Chatillon, France, 2014. – С. 1-4.

7. Remillieux, G. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized/ Remillieux G., Delhaye F.// Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS) , 2014. – С. 1-13.

8. Маляров С.П. Система стабилизации амплитуды колебаний резонатора кориолисового вибрационного гироскопа / С.П. Маляров, Ю.В. Кохан, В.В. Чиковани // Вісник інженерної академії України. – №1.– 2013. – С. 20-25.

9. Цірук В.Г. Система ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу легкої броньованої техніки / В.Г. Цірук // Технологічні комплекси. – №2 (10). – 2014. – С. 134- 141.

10. Sokolov A.V. Development of a gyro stabilization system with fiber-optic gyroscopes for an air-sea gravimeter / Sokolov A.V., Krasnov A.A., Starosel'tsev L.P., Dzyuba A.N. // Gyroscopy Navig. – 2015. – №6. – P. 338–343.

11. Calvo M. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records / M. Calvo, J. Hinderer, S. Rosat, H. Legros, J.-P. Boy, B. Ducarme, W. Zürn // Journal of Geodynamics. – 2017. – №106. – P. 30–32.

12. Roussel C. Integration of a Strapdown Gravimeter System in AN Autonomous Underwater Vehicle / Roussel C., Verdun J., Cali J., Maia M. // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Volume XL-5/W5. – P. 199–206.

13. С.А. Кудряков, Е.В. Соболев, Е.А. Рубцов Теоретические основы фильтрации сигналов: научное пособие. – С. Пб, 2018. – 198 с.

14. Bezvesilna O. Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk , A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – №440. – P.753-761.

15. Bezvesilna O. Design of piezoelectric gravimeter for automated aviation gravimetric system / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk , A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, T. Chilchenko // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2016. – Vol. 10 Issue 1. – P. 43–47.

16. Патент України на винахід № 113033. Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи / Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В., Бичук Р.В. – № a2015 09858; заявл. 12.10.2015; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22/2016.

17. Уланов Г.М. Регулирование по возмущению. Компенсация возмущений и инвариантность: научное пособие. – М: ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО, 1960. – 110 с.

References

1. Bezvesilna O.M. Systema zakhystu pryladovoho kompleksu vid udarnykh ta vibratsiinykh vplyviv: monohrafiia z hryfom NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho» / O.M. Bezvesilna, A.H. Tkachuk. – 2018, Kyiv: NPO «Priorytety». – 170 s.

2. Tarasenko A. Bronetankovaia tekhnyka Ukraynы: ytohy, potentsyal, perspektyvы / A. Tarasenko // Bronetankovaia tekhnyka Ukraynы. – 2008. – №4. – S. 29–35 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://militaryarticle.ru/tekhnika-i-vooruzhenie/2008/11678-bronetankovaja-tehnika-ukrainy-2. Accessed 06 Mar 2020

3. Bazilo K.V. Skhemotekhnichne modeliuvannia piezoelektrychnoho peretvoriuvacha z dodatkovymy kolyvalnymy konturamy / K.V. Bazilo // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2013. – №6. – S.166-169.

4. Kuznietsov B.I. Systema navedennia i stabilizatsii ozbroiennia lehkobronovanykh mashyn z neiromerezhevym rehuliatorom / B.I. Kuznietsov, T.Iu. Vasylets, O.O. Varfolomiiev // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2010. – №1(13). – R.112-116.

5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // Elektronika ta systemy upravlinnia. – №4(34). – 2012r. – S. 56-63.

6. Guerard J. Quartz structures for Coriolis Vibrating Gyroscopes / Guerard J., Janiaud D., Taibi R., Levy R. // Phys. & Instrum. Dept., ONERA, Chatillon, France, 2014. – S. 1-4.

7. Remillieux, G. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized/ Remillieux G., Delhaye F.// Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS) , 2014. – S. 1-13.

8. Maliarov S.P. Systema stabylyzatsyy amplytudы kolebanyi rezonatora koryolysovoho vybratsyonnoho hyroskopa / S.P. Maliarov, Yu.V. Kokhan, V.V. Chykovany // Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – №1.– 2013. – S. 20-25.

9. Tsiruk V.H. Systema udaro- i vibrozakhystu navihatsiinoho kompleksu lehkoi bronovanoi tekhniky / V.H. Tsiruk // Tekhnolohichni kompleksy. – №2 (10). – 2014. – S. 134- 141.

10. Sokolov A.V. Development of a gyro stabilization system with fiber-optic gyroscopes for an air-sea gravimeter / Sokolov A.V., Krasnov A.A., Staroseltsev L.P., Dzyuba A.N. // Gyroscopy Navig. – 2015. – №6. – R. 338–343.

11. Calvo M. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records / M. Calvo, J. Hinderer, S. Rosat, H. Legros, J.-P. Boy, B. Ducarme, W. Zürn // Journal of Geodynamics. – 2017. – №106. – R. 30–32.

12. Roussel C. Integration of a Strapdown Gravimeter System in AN Autonomous Underwater Vehicle / Roussel C., Verdun J., Cali J., Maia M. // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Volume XL-5/W5. – R. 199–206.

13. S.A. Kudriakov, E.V. Sobolev, E.A. Rubtsov Teoretycheskye osnovы fyltratsyy syhnalov: nauchnoe posobye. – S. Pb, 2018. – 198 s.

14. Bezvesilna O. Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk , A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – №440. – R.753-761.

15. Bezvesilna O. Design of piezoelectric gravimeter for automated aviation gravimetric system / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk , A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, T. Chilchenko // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2016. – Vol. 10 Issue 1. – R. 43–47.

16. Patent Ukrainy na vynakhid № 113033. Trykoordynatnyi piezoelektrychnyi hravimetr aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy / Bezvesilna O.M., Tkachuk A.H., Khylchenko T.V., Bychuk R.V. – № a2015 09858; zaiavl. 12.10.2015; opubl. 25.11.2016, Biul. № 22/2016.

17. Ulanov H.M. Rehulyrovanye po vozmushchenyiu. Kompensatsyia vozmushchenyi y ynvaryantnost: nauchnoe posobye. – M: HOSUDARSTVENNOE ЭNERHETYChESKOE YZDATELSTVO, 1960. – 110 s.

Надійшла / Paper received : 02.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-124-130
УДК 621.311

О.Б. БУРИКІН, Ю.В. МАЛОГУЛКО, А.В. СИТНИК, В.А. ГРИНИК
Вінницький національний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ СПОСТЕРЕЖНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЇВ SMART METERING ТА ПСЕВДОВИМІРЮВАНЬ

Систематизовано та досліджено можливості підвищення спостережності розподільних електричних мереж з використанням пристроїв Smart Metering, агрегованої інформації автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та псевдовимірювань. Показано доцільність застосування результатів оцінювання стану розподільних електричних мереж у інформаційних системах для аналізу енергоефективності електричних мереж. Розроблено метод зворотного перетворення зафіксованих обсягів спожитої електроенергії у псевдовимірювання графіків електричних навантажень споживачів з використанням типових графіків навантаження.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, оцінка стану, типові графіки навантаження, спостережність.

O. B. BURYKIN, YU.V. MALOHULKO, A.V. SYNTYK, V.A. HRYNYK
Vinnytsia National Technical University

THE INCREASING OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS OBSERVATION USING SMART METERING DEVICES AND FALSE MEASUREMENTS

The availability of synchronized information about the measured operating parameters of the distribution electrical network makes it possible to determine the amount of electricity consumed by standard algebraic methods. However, often due to hardware or information failure, this data may not be available throughout the day or part of it. During measurements, as well as information transmission, the influence of electromagnetic interference, resynchronization, loss of individual information packets or targeted attacks on the information network by third parties in the form of manual or "viral" interference in the information system. Thus, a necessary condition for the information system functioning is the analysis of the obtained data, their verification and recovery of lost information.

The possibilities of increasing the observation of distribution electric networks with the use of Smart Metering devices, aggregated information of automated systems of commercial electricity metering and pseudo-measurements are systematized and investigated in the work. It was shown the expediency of using the results of assessing the state of electrical distribution networks in information systems for energy efficiency analysis of electrical networks is shown.

It was developed the method of inverse conversion of the fixed volumes of the consumed electric power into pseudo-measurement of schedules of electric loadings of consumers with use of standard schedules of loading, and also a state estimation of electric networks. It is shown that the use of data from electricity metering systems to supplement the vector of the state of electrical networks with information about power changes in unobserved nodes allows to increase the adequacy of modeling of 10 (6) kV distribution networks and the quality of electricity saving measures.

The efficiency and effectiveness of the proposed method is confirmed by computational experiments to determine and evaluate the reliability of pseudo-measurements of substation load schedules. The error in the calculation of voltages on the buses of 10 kV TP is within 0.2%, which compared to the imbalance of supply and consumption is acceptable for the preparation of a revised structure of the electricity balance.

Keywords: distribution power networks, state estimation, typical load schedules, observation.

Постановка проблеми

Наявність синхронізованої інформації про виміряні режимні параметри розподільної електричної мережі дає змогу визначати обсяги спожитої електроенергії стандартними алгебраїчними методами [1],[2]. Проте, досить часто через відмову апаратного або інформаційного забезпечення ці дані можуть не надходити протягом всієї доби або її частини. Під час вимірювань, а також передачі інформації спостерігається вплив електромагнітних завад, ресинхронізація, втрати окремих пакетів інформації або спрямовані атаки на інформаційну мережу сторонніми особами у вигляді ручного або «вірусного» втручання у роботу інформаційної системи [1]-[4]. Таким чином, необхідною умовою функціонування інформаційної системи є аналіз отриманих даних, їх перевірка та відновлення втраченої інформації.

Аналіз останніх джерел

На сьогодні використовуються декілька підходів до синхронізації, відновлення втраченої та перевірки виміряної інформації (рис.1).

Основною спільною вимогою наведених підходів є наявність не втрачених даних. Тобто для частини мережі необхідні вимірювання у об'ємах, достатніх для відновлення інформації. За відсутності вимірювань застосовують ретроспективні дані для їх відновлення та виявлення викидів у вимірюваннях.

Відповідно до проведеного аналізу перспективним є застосування комбінованого підходу методів оцінки стану [12]-[18] для часової синхронізації інформації та застосування типових графіків електричних навантажень для відновлення агрегованої у часі інформації [9]-[11] про перетікання електроенергії. Перевагою застосування такого підходу є можливість аналізу енергоефективності розподільних ЕМ зі значною часткою розосереджених джерел енергії. Особливо це стосується фотовольтаїчних електричних станцій, оскільки вони мають досить передбачуваний графік генерування відповідно до типового метрологічного року [19], [20]. Це дає змогу використовувати його у математичній моделі в якості типового, нарівні із графіками електроспоживання.

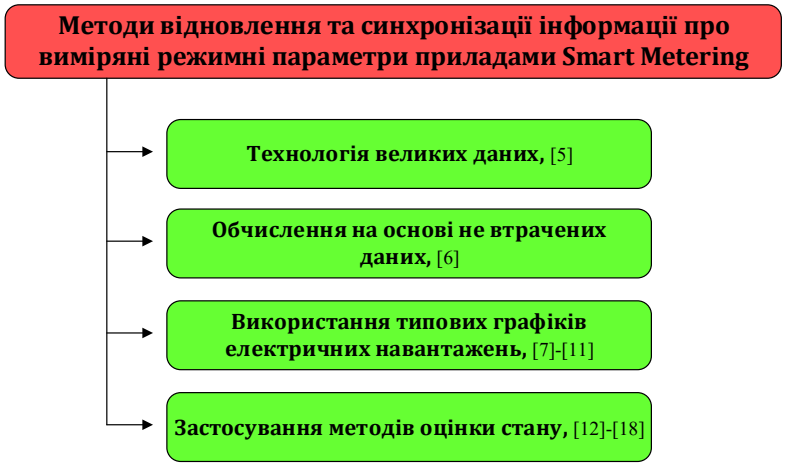


Рис. 1. Методи відновлення та синхронізації інформації про виміряні режимні параметри приладами Smart Metering

Метою роботи є: підвищення достовірності результатів аналізу енергоефективності розподільних електричних мереж шляхом вдосконалення методів підвищення їх спостережності

Виклад основного матеріалу

Відповідно до проведеного аналізу для подальшого дослідження пропонується підвищення спостережності розподільної електричної мережі шляхом застосування типових графіків електричних навантажень для відновлення агрегованої у часі інформації білінгової підсистеми про облік електроенергії. Для електричних мереж зі значною інтеграцією відновлювальних джерел енергії пропонується використання графіка генерування відповідно до типового метрологічного року або прогнозованого графіка генерування. Це дозволить підвищити спостережність розподільних електричних шляхом наповнення розрахункової моделі оцінки стану псевдовимірюваннями за мінімальної кількості встановлених пристроїв Smart Metering.

Використання типових графіків електричних навантажень для підвищення спостережності розподільної електричної мережі

Типовий графік навантаження (ТГН) – усереднений за часом та набором електроприймачів графік навантаження, аналогічних за режимом роботи споживачів. Навантаження типового графіка, як правило, нормується відносно максимальної величини і надається у відсотках. Традиційно ТГН використовувались під час електричних розрахунків для складання балансу потужності, проектування електричних мереж, а також при розрахунках технологічних витрат електроенергії на її передачу та розподіл електричними мережами [11].

На сьогодні в умовах балансуючого ринку електроенергії і електропостачання за двосторонніми договорами при плануванні режимів ЕЕС на наступну добу ТГН мають суттєве значення. Відповідальність за баланс електроенергії в ЕЕС і його підтримування перекладається на всіх учасників щодо складання добових графіків споживання електричної енергії, енергоефективності генерування та споживання електроенергії.

При формуванні нових економічних відносин на ринку електроенергії споживання розраховується по годинах, оскільки ціна на електроенергію змінюється кожну годину. Від точності прогнозування погодинного добового графіка споживання електроенергії електропостачальниками залежить, наскільки тарифний план для споживача буде привабливим.

Однією з функцій оператора системи розподілу є розроблення типових графіків (профілів) навантаження для окремих категорій споживачів. Вихідною інформацією для аналізу та групування графіків електричних навантажень використовувалися масиви даних, які архівовані під час роботи АСКОЕ. При цьому для кожного ПГН визначався код споживача – джерела цього ПГН згідно КВЕД-2010, що в подальшому має спростити користування розробленими графіками навантажень і дозволить відносити даного споживача до того чи іншого ТГН [21].

Оператори системи передачі та розподілу електроенергії можуть збирати щогодинні дані про електроспоживання двома шляхами: за допомогою погодинного лічильника з дистанційним зчитуванням та на підставі типового графіка навантаження.

Типові графіки подаються у вигляді погодинних характеристик математичного очікування та середньоквадратичного відхилення активного й реактивного навантажень, а також характеристики коефіцієнту кореляції активного й реактивного навантажень (рис. 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2	Таблиця А.1.1																		
3	Графік електричних навантажень споживачів наступних категорій видів економічної діяльності																		
4	«01.45» «14.11» «10.42» «32.11» «30.40» «10.31» «02» «16.2» «25.93»																		
5	«30.92» «03.12» «22» «11.05» «24.42»																		
6	Місяць - січень Коефіцієнт форми - 1.07																		
7	P	39	48	42	55	31	54	49	58	88	59	72	83	71	79	57	59	100	77
8	σ_P	17	17	16	15	13	14	14	17	26	31	31	33	24	28	30	30	32	22
9	Q	12	18	11	19	10	20	19	23	26	20	23	24	16	23	19	17	28	22
10	σ_Q	7	7	6	6	4	5	6	11	13	20	19	19	10	15	19	18	18	10
11	K	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
12																			

Рис. 2. Інформація подана у «Альбомі типових графіків електричних навантажень»

Математичне очікування навантаження нормується відносно максимального значення і подається у відсотках. Таким чином, ТГН дає змогу розкласти значення сумарної спожитої енергії за обліковий період до вигляду погодинного графіка імовірного навантаження, доповнюючи вектор вимірювань для задачі оцінки стану розподільної електричної мережі додатковими значеннями:

$$J_{ij}^{ТГН}(x)=\frac{\left[z_{ij}^{ТГН}-h_i(x)\right]^2}{\left[\sigma_{ij}^{ТГН}\right]^2}, \tag{1}$$

де $z_{ij}^{ТГТ}=M(P_{ij}^{ТГТ})\cdot P_i^{ВДЕ}$ – псевдовимірювання отримане на основі інформації про КВЕД та відповідний йому ТГН і-го споживача.

У якості очікуваних середньоквадратичних відхилень псевдовимірювання $\sigma_{ij}^{ТГН}$ для неспостережних вузлів пропонується використовувати значення середньоквадратичних відхилень для активної та реактивної потужностей σ, наведені у атласі типових графіків навантаження для споживача (див. рис.2), згідно його коду КВЕД [21].

Оскільки інформація у біллінговій системі подається у інтегрованому вигляді за певні періоди часу, а інформація про ТГН нормується відповідно максимального спожитого значення потужності Рімах, то одним із шляхів перетворення інформації із білінгової системи у псевдовимірювання, яке відповідає окремому ступеню графіку навантаження буде процедура зворотнього інтегрування.

Так як ТГН позитивна і зростаюча функція, то інтеграл ТГН виражає площу ступінчастої фігури, складеної з «вхідних» прямокутників або лівих прямокутників. Тому вираз для розрахунку максимального спожитого значення потужності можна отримати з використанням методу чисельного інтегрування на інтервалі від a до b для n інтервалів. Оскільки для кожного інтервалу інтегрування крок сітки однаковий, то вираз для визначення максимального спожитого значення потужності Рімах запишеться так:

$$P_i^{Б}=\int_a^b f(x)dx=\frac{b-a}{n}\sum_{j=1}^{n}M(P_{ij}^{ТГН})\cdot P_i^{\max} \quad\Rightarrow\quad P_i^{\max}=\frac{P_i^{Б}}{\frac{b-a}{n}\sum_{j=1}^{n}M(P_{ij}^{ТГН})}$$

або для добового інтервалу [0;24] з поділом проміжку інтегрування n=24 рівних частин:

$$P_i^{\max}=\frac{P_i^{Б}}{\frac{24-0}{24}\sum_{j=1}^{24}M(P_{ij}^{ТГН})}=\frac{P_i^{Б}}{\sum_{j=1}^{24}M(P_{ij}^{ТГН})}.$$

Таким чином, цільова функція (1) з урахуванням інформації ТГН у явному вигляді та матричній формі може бути записана таким чином:

$$J(x)=\left[\begin{bmatrix} z^{SM} \\ z^{ТГН}\end{bmatrix}-h(x)\right]^T diag\left[\left(\sigma^{SM}\right)^2 \quad \left(\sigma^{ТГН}\right)^2\right]^{-1}\left[\begin{bmatrix} z^{SM} \\ z^{ТГН}\end{bmatrix}-h(x)\right]\to \min, \tag{2}$$

Таким чином недостатність вектору спостереження z у цільовій функції (1) можна компенсувати інформацією з «Альбому типових графіків електричних навантажень», а саме математичним очікуванням активного навантаження $M(P_{ij}^{ТГН})$ *i*-го вузла вимірювання на ступені *j*, його середньоквадратичним

відхиленням $\sigma_i^{ТГН}$ та інформації про спожиту потужність у неспостережному вузлі з білінгової системи $P_i^Б$ у вигляді цільової функції (2).

Перевірка працездатності пропонованого методу підвищення спостережності розподільних електричних мереж

Для перевірки адекватності пропонованого методу підвищення спостережності розподільних електричних мереж на основі ТГН було використано фрагмент міських мереж 10 кВ м. Вінниця – фідер Ф-165 підстанції 110/10 кВ «Західна». Фідер містить 5 споживальних підстанції (рис. 3) з трансформаторами 10/0,4 кВ різних потужностей. Від підстанцій фідера отримують живлення промислові (17 %) та побутові (83 %) споживачі. Використовуючи електронні лічильники, для фідера було забезпечено синхронізовану реєстрацію параметрів надходження та відпуску електроенергії з півгодинним інтервалом протягом 11 діб. Таким чином було забезпечено повну спостережність мережі для визначення балансових втрат електроенергії.

Відповідно до розробленого методу на рис. 4 показано відпуск електроенергії, зафіксований на шинах 0,4 кВ ТП-455 (побутова) та відповідний йому графік навантаження за одну добу 26.04, відновлений за ТГН та інформацією з білінгової підсистеми.

Для експериментального підтвердження можливості використання ТГН з метою формування псевдовимірів, було виконано заміну виміряних потужностей навантаження для всіх ТП на відтворені за типовими графіками та сумарним споживанням електроенергії протягом періоду експерименту. Ефективність оцінювання стану розподільних електричних мереж за відсутності достатньої інформації показано на рис. 5. Після оцінювання стану ЕМ та визначення h(x) було розраховано відносні похибки оцінювання параметрів режимів. Похибка розрахунку напруги на шинах ТП 10 кВ знаходиться у межах 0,2%, яка порівняно з небалансом надходження та споживання є припустимою для складання уточненої структури балансу електроенергії.

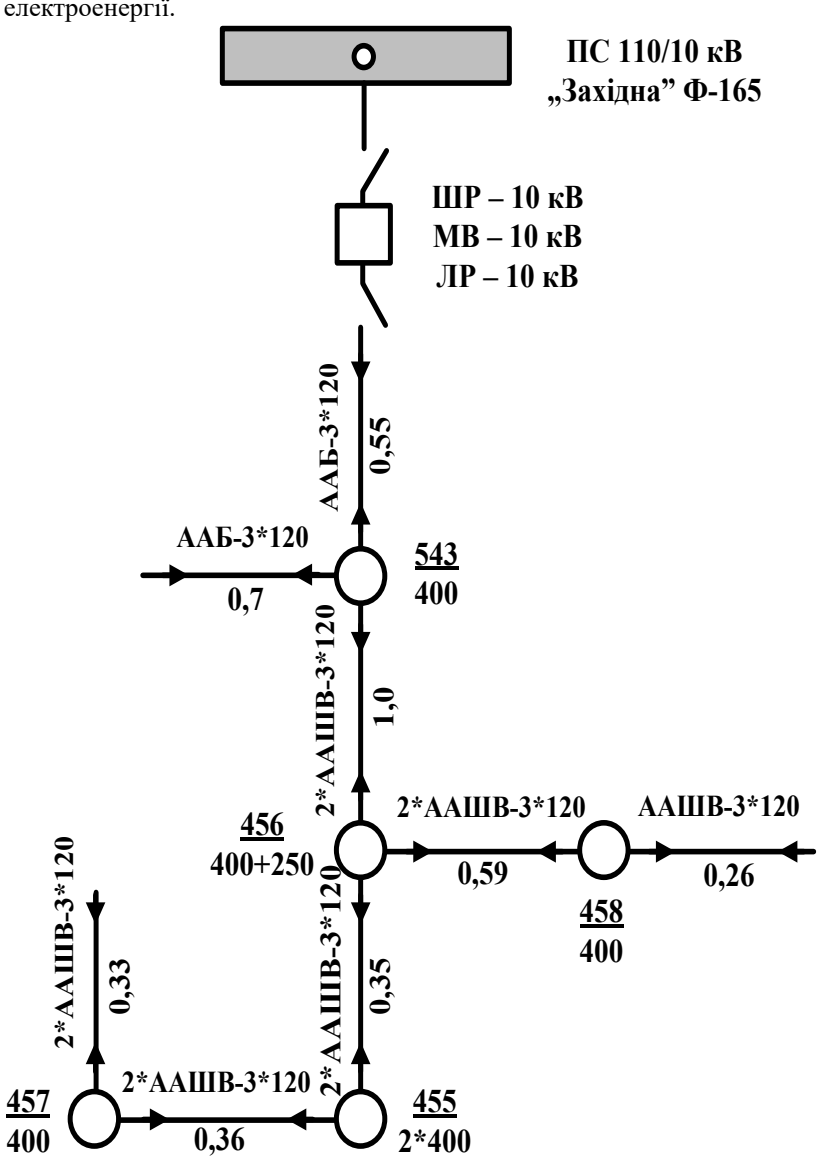


Рис. 3. Фрагмент спостережної електричної мережі 10 кВ

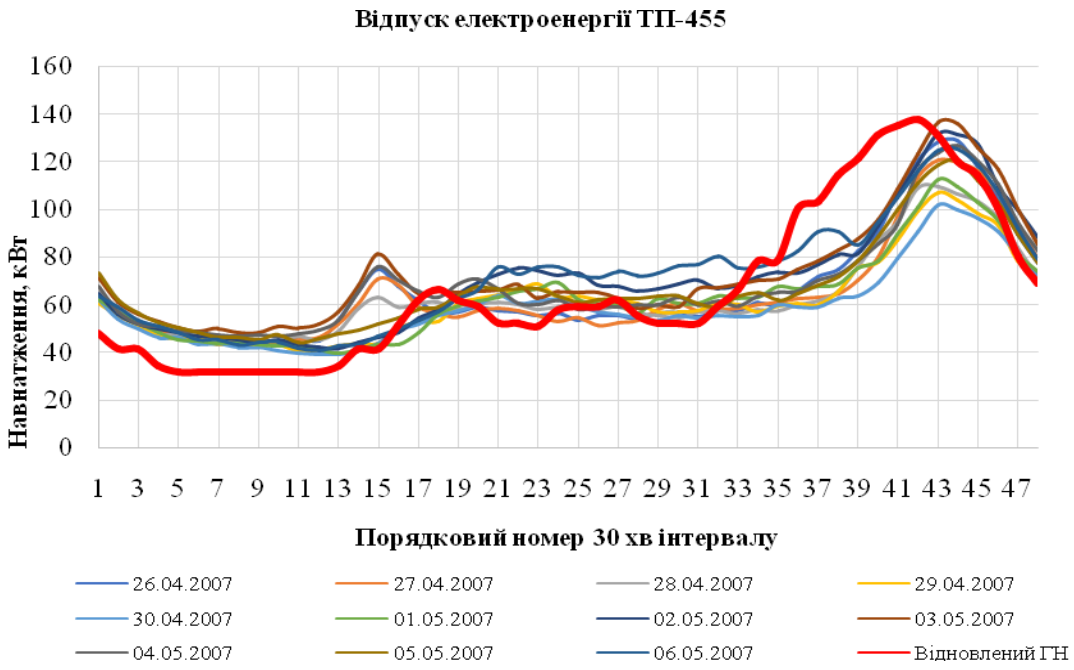


Рис. 4. Відпуск електроенергії, зафіксований на шинах 0,4 кВ ТП-455 (побутова) та відновлений по ТГН графік навантаження за одну добу 26.04

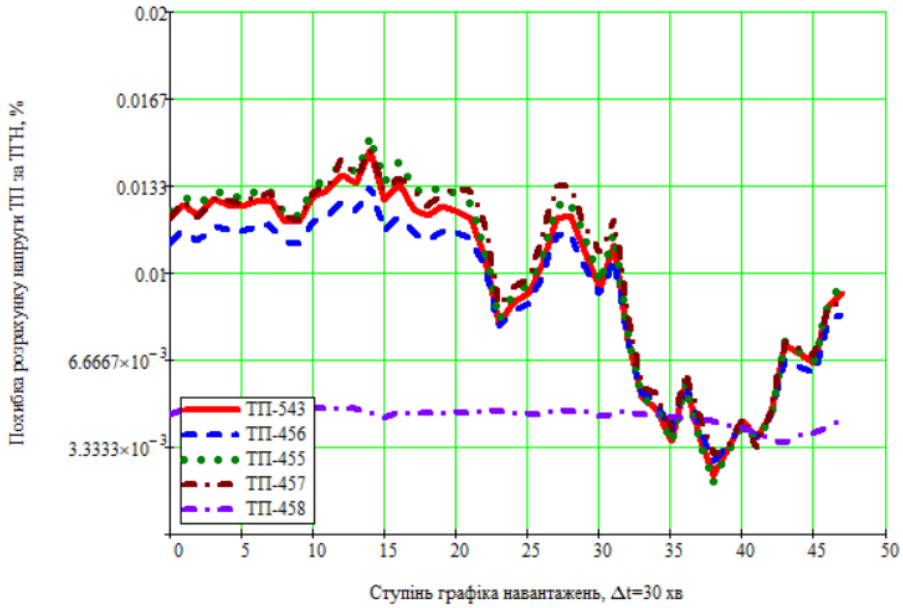


Рис. 5. Похибка розрахунку напруги ТП з оцінки стану за відновленими ТГН та реальними графіками навантаження

Висновки

В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення достовірності результатів аналізу енергоефективності розподільних електричних мереж шляхом вдосконалення методів підвищення їх спостережності.

Розроблено метод зворотного перетворення зафіксованих обсягів спожитої електроенергії у псевдовимірювання графіків електричних навантажень споживачів з використанням типових графіків навантаження, а також оцінки стану електричних мереж. Показано, що використання даних з систем обліку електроенергії для доповнення вектору стану електричних мереж інформацією про зміни потужності у неспостережних вузлах дає змогу підвищити адекватність моделювання режимів розподільних мереж 10(6) кВ та якість розроблення електроощадних заходів.

Література

1. Estimation of the dynamics of power grid operating parameters based on standard load curves / Tomashevskyi, Y., Burykin, O., Kulyk, V., Malogulko, J. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, 6(8-102), стр. 6–12

2. A. von Meier, E. Stewart, A. McEachern, M. Andersen and L. Mehrmanesh, "Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2926-2936, Nov. 2017.doi: 10.1109/TSG.2017.2720543

3. A. Majumdar, Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal and R. Gottschalg, "Centralized Volt–Var Optimization Strategy Considering Malicious Attack on Distributed Energy Resources Control," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 148-156, Jan. 2018.doi: 10.1109/TSTE.2017.2706965

4. G. Grigoras, G. Cartina, E. C. Bobric and C. Barbulescu, "Missing data treatment of the load profiles in distribution networks," 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, 2009, pp. 1-5. doi: 10.1109/PTC.2009.5282021

5. L. Zhichao and Z. Yuping, "Research on Distribution Network Operation and Control Technology Based on Big Data Analysis," 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1158-1161. doi: 10.1109/CICED.2018.8592531

6. C. Cheng, H. Gao, Y. An, X. Cheng and J. Yang, "Calculation method and analysis of power flow for distribution network with distributed generation," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 2020-2024. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432571

7. L. Brockmeier, J. Kromrey, and K. Hogart, «No randomly Missing Data in Multiple Regression Analysis: An Empirical Comparison of Ten Missing Data Treatments», Multiple Linear Regression Viewpoints, vol. 29, pp. 8 – 29, 2003

8. Acuna, Edgar & Rodriguez, Caroline. (2004). The Treatment of Missing Values and its Effect on Classifier Accuracy. 10.1007/978-3-642-17103-1_60.

9. Y. Kim, J. Shin, J. Song and I. Yang, "Customer clustering and TDLP (typical daily load profile) generation using the clustering algorithm," 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, 2009, pp. 1-4. doi: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356926

10. I. P. Panapakidis and G. K. Papagiannis, "Application of the load profiling methodology In Short-Term Bus Load Forecasting," MedPower 2014, Athens, 2014, pp. 1-8. doi: 10.1049/cp.2014.1694

11. Буславець О.А. Типові графіки електричних навантажень у 3D зображенні / О. А. Буславець, А. О. Квицинський, Л. Н. Кудацький, С. Я. Меженний, Л. В. Мойсеєнко // Енергетика та електрифікація.– 2016.– № 2. – С. 2–12.

12. A. Alimardani, F. Therrien, D. Atanackovic, J. Jatskevich and E. Vaahedi, "Distribution System State Estimation Based on Nonsynchronized Smart Meters," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 2919-2928, Nov. 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2429640

13. B. Matthiss, J. Erb and J. Binder, "Using Smart Meters for Distribution Grid State Estimation," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Porto, Portugal, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SEST.2019.8849096.

14. K. Samarakoon, J. Wu, J. Ekanayake and N. Jenkins, "Use of delayed smart meter measurements for distribution state estimation," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2011.6039384.

15. A. Primadianto and C. N. Lu, “A review on distribution system state estimation,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, Sept 2017.

16. F. Ni, P. H. Nguyen, J. F. G. Cobben, H. E. van den Brom, and D. Zhao, “Uncertainty analysis of aggregated smart meter data for state estimation,” in 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Sept 2016, pp. 1–6.

17. A. Gómez-Expósito, C. Gómez-Quiles, and I. Džafic, “State estimation ´in two time scales for smart distribution systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 421–430, Jan 2015.

18. M. Pau, E. Patti, L. Barbierato, A. Estebsari, E. Pons, F. Ponci, and A. Monti, “Low voltage system state estimation based on smart metering infrastructure,” in 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Sept 2016, pp. 1–6.

19. Kasaeian, Alibakhsh & Sameti, Mohammad & Razi Astaraei, Fatemeh. (2014). Simulation of a ZEB Electrical Balance with aHybrid Small Wind/PV. Sustainable Energy. 2. 5.

20. S. Venkataraman, C. Ziesler, P. Johnson and S. Van Kempen, "Integrated Wind, Solar, and Energy Storage: Designing Plants with a Better Generation Profile and Lower Overall Cost," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 16, no. 3, pp. 74-83, May-June 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2793478.

21. Інформаційне забезпечення задач зменшення втрат електроенергії в електричних мережах: монографія / О. А. Буславець, П. Д. Лежнюк, М. М. Черемісін – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 195 с.

References

1. Estimation of the dynamics of power grid operating parameters based on standard load curves / Tomashevskyi, Y., Burykin, O., Kulyk, V., Malogulko, J. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, 6(8-102), стр. 6–12

2. A. von Meier, E. Stewart, A. McEachern, M. Andersen and L. Mehrmanesh, "Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2926-2936, Nov. 2017.doi: 10.1109/TSG.2017.2720543

3. A. Majumdar, Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal and R. Gottschalg, "Centralized Volt–Var Optimization Strategy Considering Malicious Attack on Distributed Energy Resources Control," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 148-156, Jan. 2018.doi: 10.1109/TSTE.2017.2706965

4. G. Grigoras, G. Cartina, E. C. Bobric and C. Barbulescu, "Missing data treatment of the load profiles in distribution networks," 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, 2009, pp. 1-5. doi: 10.1109/PTC.2009.5282021

5. L. Zhichao and Z. Yuping, "Research on Distribution Network Operation and Control Technology Based on Big Data Analysis," 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1158-1161. doi: 10.1109/CICED.2018.8592531

6. C. Cheng, H. Gao, Y. An, X. Cheng and J. Yang, "Calculation method and analysis of power flow for distribution network with distributed generation," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 2020-2024. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432571

7. L. Brockmeier, J. Kromrey, and K. Hogart, «No randomly Missing Data in Multiple Regression Analysis: An Empirical Comparison of Ten Missing Data Treatments», Multiple Linear Regression Viewpoints, vol. 29, pp. 8 – 29, 2003

8. Acuna, Edgar & Rodriguez, Caroline. (2004). The Treatment of Missing Values and its Effect on Classifier Accuracy. 10.1007/978-3-642-17103-1_60.

9. Y. Kim, J. Shin, J. Song and I. Yang, "Customer clustering and TDLP (typical daily load profile) generation using the clustering algorithm," 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, 2009, pp. 1-4. doi: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356926

10. I. P. Panapakidis and G. K. Papagiannis, "Application of the load profiling methodology In Short-Term Bus Load Forecasting," MedPower 2014, Athens, 2014, pp. 1-8. doi: 10.1049/cp.2014.1694

11. Buslavets O.A. / O. A. Buslavets, A. O. Kvytsynskyi, L. N.. Typical graphs of electrical loads in a 3D image / O. A. Buslavets, A. O. Kvytsynskyi, L. N. Kudatskyi, S. Ya. Mezhennyi, L. V. Moiseienko // Energy and electrification.– 2016.– № 2. – P. 2–12.

12. A. Alimardani, F. Therrien, D. Atanackovic, J. Jatskevich and E. Vaahedi, "Distribution System State Estimation Based on Nonsynchronized Smart Meters," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 2919-2928, Nov. 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2429640

13. B. Matthiss, J. Erb and J. Binder, "Using Smart Meters for Distribution Grid State Estimation," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Porto, Portugal, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SEST.2019.8849096.

14. K. Samarakoon, J. Wu, J. Ekanayake and N. Jenkins, "Use of delayed smart meter measurements for distribution state estimation," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2011.6039384.

15. A. Primadianto and C. N. Lu, “A review on distribution system state estimation,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, Sept 2017.

16. F. Ni, P. H. Nguyen, J. F. G. Cobben, H. E. van den Brom, and D. Zhao, “Uncertainty analysis of aggregated smart meter data for state estimation,” in 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Sept 2016, pp. 1–6.

17. A. Gómez-Expósito, C. Gómez-Quiles, and I. Džafic, “State estimation ´in two time scales for smart distribution systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 421–430, Jan 2015.

18. M. Pau, E. Patti, L. Barbierato, A. Estebsari, E. Pons, F. Ponci, and A. Monti, “Low voltage system state estimation based on smart metering infrastructure,” in 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Sept 2016, pp. 1–6.

19. Kasaeian, Alibakhsh & Sameti, Mohammad & Razi Astaraei, Fatemeh. (2014). Simulation of a ZEB Electrical Balance with aHybrid Small Wind/PV. Sustainable Energy. 2. 5.

20. S. Venkataraman, C. Ziesler, P. Johnson and S. Van Kempen, "Integrated Wind, Solar, and Energy Storage: Designing Plants with a Better Generation Profile and Lower Overall Cost," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 16, no. 3, pp. 74-83, May-June 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2793478.

21. Information support of reduction losses problems problems of the electric power in electric networks: monograph / O. A. Buslavets, P. D. Lezhniuk, M. M. Cheremisin – Vinnytsia: VNTU, 2020. – 195 p.

Надійшла / Paper received : 03.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-131-140
УДК 681.5

О.Я. ВОЛОШАНЮК, О.В.НЕЧИПОРЕНКО
Черкаський державний технологічний університет

СИНТЕЗ ПОДОБИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧОЮ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

Анотація. 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 іще 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, в залежності 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, як:

$$\sigma_{ВЫХ}^{(p=const)} = \sigma_{ВЫХ}^{(p=\mathrm{var})} + K_{РЕГ}^{(ВЫХ)}(s)\Delta X_{РЕГ}^{p=const)}, \quad (1)$$

де $\sigma_{ВЫХ}^{(p=const)}$ – зміна вихідного параметра $\sigma_{ВЫХ}$ при заданому збуренні при $p = const$;

$\sigma_{ВИХ}^{(p=\mathrm{var})}$ – зміна параметра $\sigma_{ВИХ}$ при заданому збуренні в умовах $p = \mathrm{var}$;

$K_{РЕГ}^{(ВЫХ)}$ – передаточна функція вихідного параметра відносно регулювального діяння;

$X_{РЕГ}^{p=const)}$ – зміна параметра при даному регулювальному діянні системи регулювання тиску перед споживачем. Для оцінки якості регулювання у [3] пропонується інтегральний критерій:

$$I = \int_0^{\infty} \sigma dt, \quad (2)$$

де σ – регульований параметр.

Для часу сервомотора (виконавчого механізму) наводяться такі оптимальні значення $T_{сопт}$:

Для П та ПІ-регуляторів $T_{сопт} \approx 2\tau$, з допуском $T_{сопт} \approx (1...4)\tau$;

Для ПІД-регуляторів $T_{сопт} \approx \tau$, з допуском $T_{сопт} \approx (0{,}75...2)\tau$

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:

$$y = \frac{Ke^{-\tau_0 S}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_i s + 1)} \quad (3)$$

За методом Андерсона крива розгону об'єкта регулювання записується у вигляді:

$$\sigma(t) = AK + K_1 e^{\frac{-t}{T_1}} - K_2 e^{\frac{-t}{T_2}} \quad (4)$$

де $K_1,\ K_2 > 0$, якщо $T_2 > T_1$

У [5] наведені рівняння теплового балансу енергогенеруючої системи. На вході до турбіни генератора:

$$G_0 = \frac{N_e}{\sum \alpha_j H_i \eta_T \eta_Г} \quad (5)$$

де N_e - задана електрична потужність турбогенератора;

$\eta_T, \eta_Г$ – механічний ККД турбіни і генератора;

α_j, H_i – внутрішня робота на 1 кг свіжої пари

На виході з котла:

$$G_{ПП} = \alpha_K G_0 \quad (6)$$

де $\alpha_K \approx 1 + \alpha_y (\alpha_y \approx 0{,}02)$

Рівняння теплового навантаження котла:

$$Q_K = G_{ПП}(h_0 - h_{ПВ}) + G_{ВП}(h^T - h^0_{ВП}) \quad (7)$$

Рівняння витрати тепла на турбоустановку:

$$Q_T = G_T(h_0 - h_{ПВ}) + G_{ВП}(h^T - h^0_{ВП}) \quad (8)$$

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 $k^*_Д = 1/k_p$; $T^*_д = T^*_i$; $T_1 = T_Д$;

$k^*_Д$ - 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 — в залежності 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, при втіленні 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 по запобіганню 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, 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.

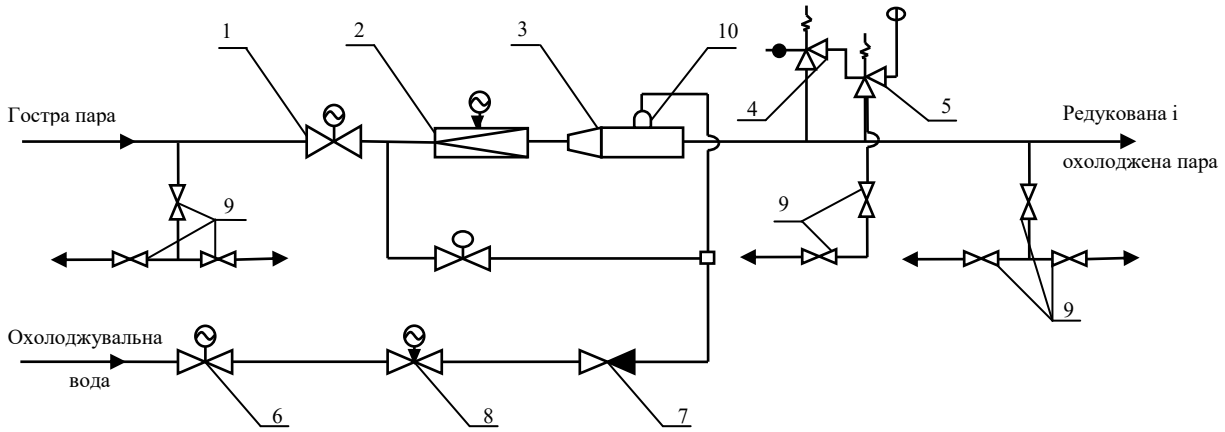


Рис. 1. Схема ШРОУ класичного типу:
1 - заслінка; 2 - клапан дросельний, 3 – охолоджувач пари; 4 - клапан імпульсний; 5 - ГПК, 6, 9 – клапани запирання 7 - клапан зворотній; 8 - клапан регулювальний. 10 - форсунка механічного розпилювання води [9]

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 по каналах 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 $E_{ПР} = (V, T, P)$, 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:

$$\Delta E = E_{ПР} - E_n(t_i), \tag{11}$$

Похідна функції повної енергії за часом, тобто швидкість зміни повної енергії обчислюється, як:

$$E^{'} = \frac{dE_{ПР}}{dt} \approx \frac{\Delta E_{П}}{\Delta t} = \frac{E_{П}(t_i) - E_{П}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (12)$$

Друга похідна функції повної енергії за часом:

$$E^{''} = \frac{dE^{'}_{ПР}}{dt} \approx \frac{\Delta E^{'}_{П}}{\Delta t} = \frac{E^{'}_{П}(t_i) - E^{'}_{П}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (13)$$

Енергетичний баланс обчислюється згідно [10].

Для потоку насиченої пари повна енергія являє собою суму кінетичної енергії E_K, що визначається швидкістю та секундною витратою маси пари, потенційної енергії механічного тиску пари E_p та тепловою енергією E_T, наданою парі в процесі її перегрівання.

Потік кінетичної енергії визначається загальновідомою формулою

$$E_k^{'} = \frac{V\rho V^2}{2S} \quad (14)$$

де V – швидкість потоку, ρ — густина пари, S – площа перетину каналу.

Потік потенційної енергії обчислюється, як

$$E_p^{'} = V \times p, \quad (15)$$

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:

$$q_П = \int_{t_Н}^{t} c_p dt = h - h^{'} = u - \ddot{u} + P(v - \ddot{v}) \quad (16)$$

де c_p — 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:

$$t_{КР} = \frac{\Delta E(t_i)}{E_П^{'}(t_i)} \quad (17)$$

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 $t = t_П + \sigma$, де $\sigma \le t_{ВПД}$, **тобто іще 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.

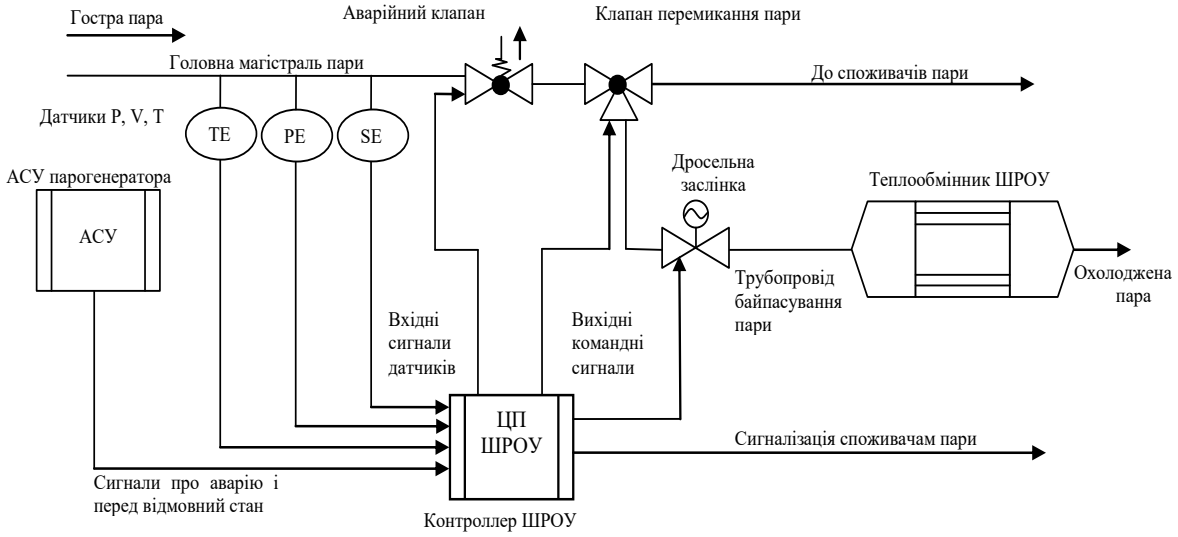


Рис. 2. Функціональна схема ШРОУ (варіант)

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 трубопровіду бай пасування 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 $t_{КР} = \dfrac{\Delta E(t_i)}{E'_{П}(t_i)}$ на основі отриманих значень перевіряємо умову $t_{КР} > t_{ВПД} + t_З$, 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.

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.

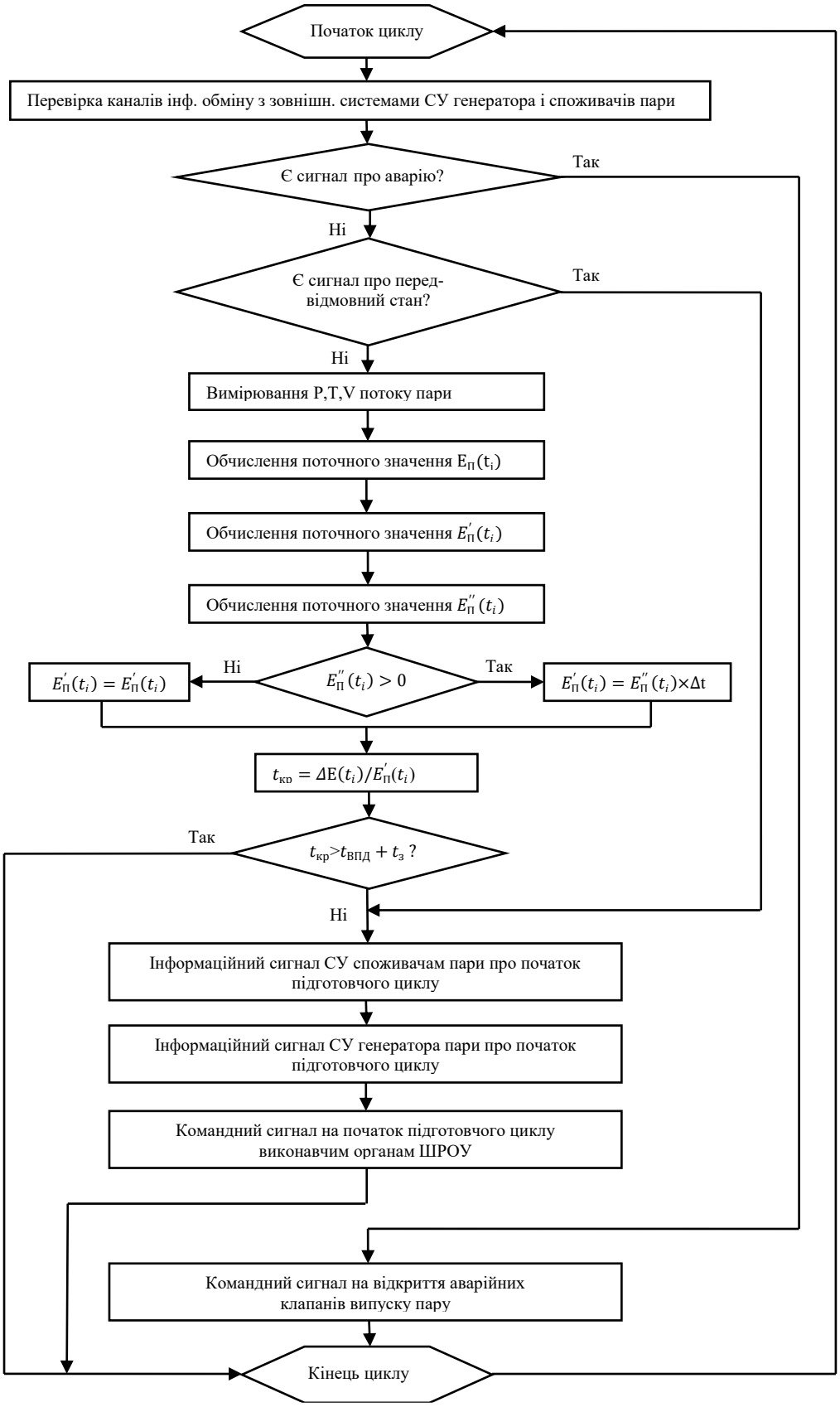


Рис. 3. Спрощений алгоритм роботи системи керування ШРОУ з випереджаючим прогнозом

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 процессов 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 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8. — Назва з екрану.

10. Буланин В. А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения / Буланин В. А. // 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. Levadnyy V. A. Ustroystvo dlya ponizheniya davleniya i temperatury para / V. A. Levadnyy, V. N. Sorokin, V. P. Kashcheyev // Trudy mezhdunarodnogo seminara po konversionnoy tekhnike. Minsk. 17–22 maya 1999 g.: v 2 ch. — Minsk, 1999. — Ch. 1. — S. 312–315.

2. Imamova L. M. O tselesoobraznosti zameny reduktsionno-okhladitelnoy ustanovki turbinoy s tselyu povysheniya effektivnosti ispolzovaniya para / L. M. Imamova, R. M. Saitov // «Simvol nauki»: Mezhdunarodnyy Nauchnyy Zhurnal. — 2016. — №11-3. — S. 68-72.

3. Novikov. S. I. Optimizatsiya avtomaticheskikh sistem regulirovaniya teplo-energeticheskogo oborudovaniya / S. I. Novikov. — Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006. — 108 s.

4. Novikov S. I. Prakticheskaya identifikatsiya dinamicheskikh kharakteristik obyektov upravleniya teploenergeticheskogo oborudovaniya / S. I. Novikov. — Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. — 64 s.

5. Pletnev G. P. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv v teploenergetike / G. P. Pletnev. — 4-e izd.. stereot. — M.: Izdatelskiy dom MEI. 2007. — 352 s., il.

6. Kulakov G. T. Kompleksnaya metodika optimizatsii parametrov dinamicheskoy nastroyki regulyatorov vpryskov / G. T. Kulakov, M. L. Gorelysheva // Energetika… (Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy). — 2009. — № 3. — S. 59-66.

7 Nechiporenko O.V. Research of control system and protection of reactor of nuclear power plants / OV Nechiporenko. Nechiporenko, O.Ya. Voloshanyuk / Computer Modeling and Optimization of Complex Systems (KMOSS-2019): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference (Dnipro, November 6-8, 2019) / Ministry of Education and Science of Ukraine, State Higher Educational Institution "Ukrainian State Chemist -technological university ". - Dnipro: Balance Club, 2019. - P. 216-217

8. Pat. 0002581996 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob raskrutki-tormozheniya koles shassi / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, V. I. Bekuzin i dr.; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye byudzhetnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego professionalnogo obrazovaniya "Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskiy universitet". — №216.015.342D ; opubl. 20.04.16.

9. Skhema ROU ChZEM [Elektronniy resurs]. — Rezhim dostupu: https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8. — Nazva z ekranu.

10. Bulanin V. A. Algoritm analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya / Bulanin V. A. // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. — 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 Težak, Ivan Bahun, Ivan Petrović // Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 199-214.

Надійшла / Paper received : 27.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-141-145
УДК 621

В.І. СТЕЦЮК, М.Ю. ВЛАСЮК
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

В роботі представлена методика аналізу теплових полів електричних машин, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності. Показано, що температурий аналіз може являтися універсальним показником якості роботи складних електромеханічних систем, до яких безпосередньо відносяться електричні машини. Такий аналіз характеризує енергоефективність системи в цілому або його окремих вузлів. Фактичні значення температури у вузлах і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованої системи. В роботі також проведено натурне моделювання реально існуючого синхронного двигуна із збудженням від постійних магнітів з внутрішнім розташуванням магнітів у роторі (Interior Permanent Magnet, IPM). Аналіз проведеного моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах з великим ступенем кореляції дозволяє апроксимувати одержані результати для електричних машин всіх типів та принципу дії. Методика теплового аналізу може мати прикладне застосування.

Ключові слова: електродвигун, температура, теплове поле, теплові втрати, рівняння теплопровідності, тепловий потік, вектор, градієнт.

V.I. STETSIUK, M.U. VLASUK
Khmelnitsky National University

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OF ELECTRICAL MACHINES

The paper presents a method of analysis of thermal fields of electric machines, built on the basis of solutions of the equations of thermal conductivity and volume distribution of heat fluxes. Since energy losses are released inside the structural elements of the engine, its temperature field is a field with internal heat sources, and the thermal conductivity equation that describes this field is inhomogeneous. The derivation of the differential equation of thermal conductivity is based on the law of conservation of energy. It is shown that temperature analysis can be a universal indicator of the quality of complex electromechanical systems, which directly include electric machines. This analysis characterizes the energy efficiency of the system as a whole or its individual components. The actual values of temperature in the nodes and their relative difference with the corresponding maximum allowable values are an indicator of the optimality of the designed system. Electromagnetic and thermal fields have a mutual influence and are mutually correlated components in the calculations of electric motors. This connection directly affects the design of any type of electric machine. For a rational analysis it is necessary to find the optimal relationship between the intensity and distribution of electromagnetic and thermal fields. It is necessary to carry out a symbiosis of methods of electromagnetic and thermal calculations, integrating them into a general mathematical model, which should provide a clear picture of the general processes occurring in electric motors. The most suitable methods for modeling the processes of magnetic and thermal fields, as well as taking into account the nonlinearity of ferromagnetic properties are numerical methods. Numerical solution of field equations with the help of software and hardware and special programs based, for example, on the methods of finite differences (MCP) or finite elements (ITU) and others, allows almost without any simplifications and assumptions with high accuracy to calculate the field distribution in any electromechanical device, for example, using ANSYS, Matlab & Simulink, Femlab. The paper also performs a full-scale modeling of a real synchronous motor with excitation from permanent magnets with the internal arrangement of magnets in the rotor (Interior Permanent Magnet, IPM). Mathematical modeling of synchronous motors on permanent magnets, aimed at studying thermal processes, revealed the universality of this technique for all other classes of electric machines.

Keywords: electric motor, temperature, heat field, heat losses, heat conduction equation, heat flux, vector, gradient.

Вступ.

Промисловістю випускається досить широка номенклатура електричних машин, серед яких найбільшу цікавість представляють синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів (СДПМ). У порівнянні з колекторними і асинхронними машинами СДПМ мають ряд істотних переваг: високий ККД, можливість роботи на малих обертах, високі регулювальні властивості, підвищена перевантажувальна здатність, високі динамічні характеристики, надійність та підвищений ресурс роботи, високі питомі енергетичні показники (відсутність втрат на збудження за рахунок застосування постійних рідкоземельних магнітів), тощо. Однак, забезпечення якісних показників електричних машин в повній мірі залежить від грамотного проектування конструкції, підбору і поєднання матеріалів, вибору оптимальних режимів роботи, в тому числі і теплових. Все вищесказане стосується всіх електричних машин, не залежно від їх типу та принципу дії. Грамотний тапловий аналіз – запорука тривалої та надійної роботи будь-якого електродвигуна.

Основна частина.

Сумарну величину теплових втрат в вузлах синхронного двигуна на постійних магнітах можна оцінити через тепловий потік. Значення теплового потоку від будь-якого матеріального тіла – універсальний

показник якості, що характеризує енергетику і здатність вузла відпрацювати необхідний ресурс. Фактичні значення температури у вузлах і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованого електродвигуна. При цьому повинно виконуватися наступне критеріальне співвідношення:

$$\frac{T_{i\,max} - T_i}{T_{i\,max}} \le 1 - C_0\,, \tag{1}$$

T_{imax} – гранично допустиме значення температури вузла (області) двигуна;

T_i – значення температури відповідного вузла;

C_0 – рекомендований запас, обумовлений певним інженерним досвідом побудови електричних машин.

Вибір конструкції, типу і параметрів обмоток, магнітної системи в цілому, повинні здійснюватися не тільки на підставі основних технічних параметрів (наприклад, заданих у ТЗ), але і з врахуванням теплових режимів електродвигуна (величини теплових втрат).

Методика теплового розрахунку електродвигуна, як правило, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності. Оскільки втрати енергії виділяються всередині елементів конструкції двигуна, поле його температури є полем з внутрішніми джерелами тепла, і рівняння теплопровідності, яке описує це поле є неоднорідним [1]. В основу виведення диференціального рівняння теплопровідності покладено закон збереження енергії, який в даному випадку може бути сформульовано таким чином: кількість теплоти dQ, введена в елементарний об'єм ззовні за час $d\tau$ внаслідок теплопровідності, а також від внутрішніх джерел, дорівнює зміні внутрішньої енергії або ентальпії речовини, що міститься в елементарному об'ємі:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \tag{2}$$

де dQ_1 – кількість теплоти, [*Дж*], введеної в елементарний об'єм шляхом теплопровідності за час $d\tau$;

dQ_2 – кількість теплоти, яка за час $d\tau$ виділилася в елементарному об'ємі dV за рахунок внутрішніх джерел;

dQ – зміна внутрішньої енергії, що міститься в елементарному об'ємі dV за час $d\tau$.

Кількість теплоти dQ, підведена в результаті теплопровідності до об'єму dV із рівняння (2.2) може бути визначена наступним чином:

$$dQ_1 = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dxdydzd\tau\,, \tag{3}$$

Поширення теплових потоків в загальному випадку в одиничному об'ємі приведено на рис. 1.

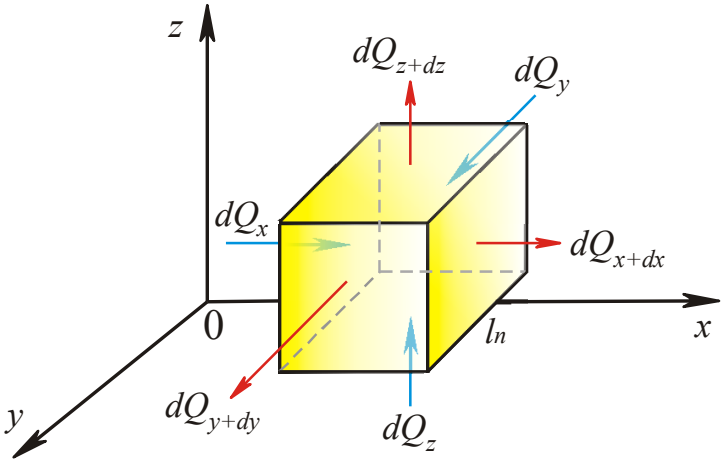


Рис. 1. Об'ємний розподіл теплових потоків

Кількість теплоти dQ_2 із рівняння (2):

$$dQ_2 = q_V d\vartheta d\tau\,, \tag{4}$$

де q_V – потужність внутрішніх джерел теплоти, [*Вт/м*^{3}].

І, нарешті, зміна внутрішньої енергії dQ із рівняння (2):

$$dQ = C_V \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau d\vartheta = c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau d\vartheta\,, \tag{5}$$

де C_V – теплоємність одиниці об'єму, [*Дж/(м³·К)]*; c_V – теплоємність единиці маси, [*Дж/(кг·К)]*; ρ – щільність речовини, [*кг·м³]*.

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right), \tag{6}$$

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -div\vec{q} + q_V . \tag{7}$$

Для функції *u(x, y, z, t)* трьох просторових змінних (*x, y, z*) і часу *t*, рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\zeta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \tag{8}$$

Для довільної системи координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \xi \nabla^2 u = 0 , \tag{9}$$

де ξ – додатна константа, ∇^2 – оператор Лапласа.

Із врахуванням динаміки процесу поширення теплоти, у виразі для щільності теплового потоку Фур'є з'являється додатковий член:

$$\vec{q} = -\sigma_t grad(t) - \tau_r \frac{\partial \vec{q}}{\partial \tau} \tag{10}$$

де σ_t – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, [*Вт/(м·К)*].

Основним недоліком такого підходу для аналізу поля температури є невизначеність при виборі коефіцієнтів теплопровідності вузлів електродвигуна і значень коефіцієнтів теплопередачі [1]. З метою уточнення цих параметрів розрахунок виконується на основі застосування законів теплопровідності, а величини коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну визначаються експериментально на модельних установках. При цьому доводиться оперувати поняттями середніх величин коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну, що відносяться до двигунів в цілому, або до великих конструктивних вузлів.

Основний закон теплопровідності встановлює кількість тепла, що проходить через поверхню *dF* за час $d\tau$ в залежності від *grad* і властивостей матеріалу – встановлений емпірично. Якщо $d\vec{q} / d\tau = 0$ виразу (10), то:

$$\vec{q} = -\sigma_t grad(t) , \tag{11}$$

В інтегральної формі це вираз запишеться так (якщо мова йде про стаціонарний потік тепла від однієї грані паралелепіпеда до іншої, рис. 1):

$$P = -\sigma_t \frac{S\Delta t}{l_n} \tag{12}$$

де *P* – повна потужність теплових втрат, *S* – площа перетину паралелепіпеда, Δt – перепад температури граней, l_n – лінійні розміри паралелепіпеда, тобто відстань між гранями.

Градієнт температури являється вектором, спрямованим по нормалі до ізотермічної поверхні в бік зростання температури і чисельно рівний частковій похідній від температури за цим напрямком. За додатний напрямок градієнта приймається напрям зростання температури:

$$grad(t) = lim \left| \frac{\Delta t}{\Delta n} \right|_{\Delta n \to 0} \tag{13}$$

Розглянемо характер зміни температури по товщині стінки і тепловий потік через стінку. Нескінченно велика плоска стінка товщиною *l* і теплопровідністю σ передає тепло при постійних температурах на границі t_1 і t_2 (граничні умови):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \xi \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \tag{14}$$

При розглянутих умовах теплота може поширюватися тільки вздовж осі x і температурне поле буде одновимірним:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \tag{15}$$

Після інтегрування виразу (14) та підстановок t_1 і t_2, отримаємо рівняння температурного поля:

$$t = \frac{t_2 - t_1}{l_{t_2}} \cdot x + t_1 \tag{16}$$

де l_{t2} – товщина стінки з боку температури t_2.

Щільність теплового потоку через плоску стінку:

$$q = -\sigma_t \frac{dt}{dx} = \frac{\sigma_t (t_1 - t_2)}{l} = \frac{t_1 - t_2}{R_t}, \qquad R_t = \frac{l}{\sigma_t}. \tag{17}$$

де R_t – термічний опір плоскої стінки.

Подальше рішення зводиться до розгляду теплової схеми заміщення, де використовується аналогія із законом Ома для електричного кола. Термічні опори вилучаються із простих геометричних фігур, на які можна розбити весь аналізований об’єм електричного двигуна.

Зв'язок коефіцієнта теплопровідності σ_t з питомою електричною провідністю σ_e в металах встановлює закон Відемана-Франца:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_e} = \frac{\pi^2}{3}\left(\frac{k}{e}\right)^2 T, \tag{18}$$

де k – постійна Больцмана;

e – заряд електрона;

T – абсолютна температура.

Відповідно до різноманітності умов тепловідводу для теплового розрахунку електричних двигунів використовуються різні методи [2]:

1. Метод точного або наближеного аналітичного рішення рівнянь для трьох або двомірних температурних полів зазвичай застосовується при значній нерівномірності поля. При цьому часто потрібні певні спрощення геометричної форми і граничних умов в математичній моделі.

2. Чисельний метод сіток застосовується в подібних випадках, але не вимагає значних спрощень форми розрахунку областей простору.

3. Метод одновимірного температурного поля застосовується для розрахунку розподілу температури по довжині обмоток і інших частин електричних машин. Оснований на приведенні трьох- і двомірних полів до одновимірного шляхом спрощеного представлення теплопередачі вздовж всіх осей координат, крім однієї, за допомогою дискретних параметрів (теплових опорів).

4. Метод еквівалентних теплових схем (ЕТС) набув найбільшого поширення зважаючи на простоту і достатню точності розрахунку. Недолік методу полягає в тому, що він дає не повну картину температурного поля, а тільки деякі середні значення температури для окремих елементів машини. Даний метод оснований на використанні теплових опорів, що з'єднуються в теплову мережу, яка імітує реальні шляхи передачі теплових потоків в машині, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом, основану на однаковій формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є).

Найбільш придатними методами для моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних заосбів та спеціальних програм, основаних, наприклад, на методах скінченних різниць (МСР) або скінченних елементів (МСЕ) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої, наприклад, за допомогою ANSYS, Matlab&Simulink, Femlab [3, 4]. Для проведення натурного моделювання візьмемо реальний синхронний двигун MITRON типу IPM (рис. 2)

Висновки.

В роботі представлена методика аналізу теплових полів електричних машин, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності. Значення теплового потоку від будь-якого матеріального тіла – універсальний показник якості, що характеризує енергетику і здатність вузла відпрацювати необхідний ресурс. Фактичні значення температури у вузлах і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованого електродвигуна.

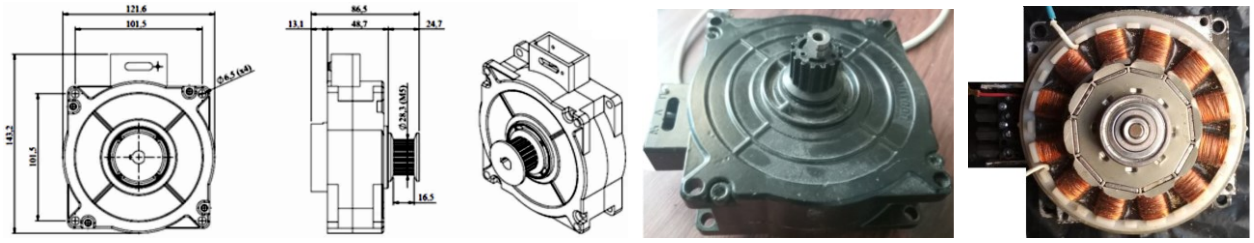


Рисунок 2 – Фото реального синхронного двигуна MITRON типу IPM

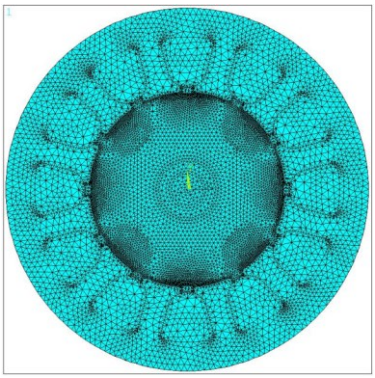


Рисунок 3 – Геометрія активної частини СДПМ з сіткою кінцевих елементів

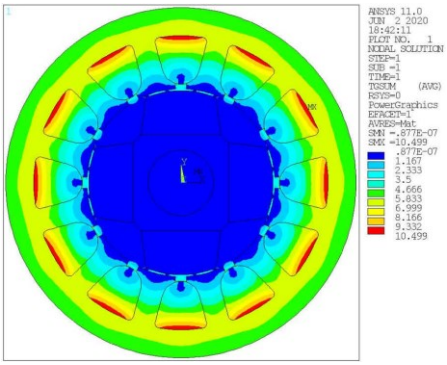


Рисунок 4 – Розподіл модуля вектора градієнта температури (*°С/м*)

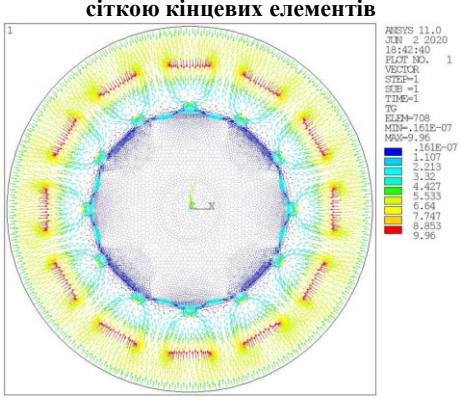


Рисунок 5 – Розподіл модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів (*°С/м*)

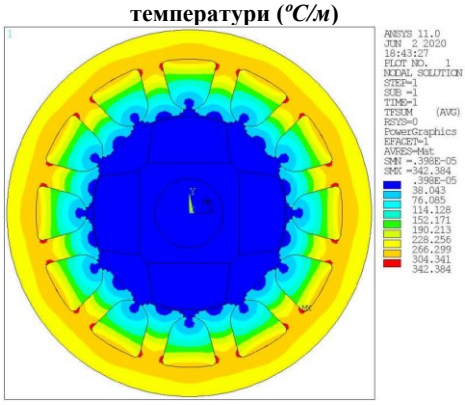


Рисунок 6 – Розподіл модуля вектора теплового потоку (*Дж/с*)

Електромагнітне і теплове поля мають взаємний вплив і являються взаємнокореляційними складовими при розрахунках електродвигунів. Цей зв'язок безпосередньо впливає на конструкцію електричної машини будь-якого типу. Для раціонального аналізу необхідно знайти оптимальне співвідношення між інтенсивністю і розподілом електромагнітних і теплових полів. Необхідно здійснити симбіоз методик електромагнітних і теплових розрахунків, інтегрувавши їх в загальній математичній моделі, яка повинна надати наочну картину загальних процесів, що протікають в електродвигунах.

Математичне моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах, направлене на вивчення теплових процесів виявило універсальність даної методики для всіх інших класів електричних машин.

Література

1. Анненков А. Н. Анализ теплового поля на постоянных магнитах с применением обратных связей по температурам / А. Н. Анненков, С. С. Акимов // Энергия-XXI век / Журнал. – Воронеж: 2013, – №1 (84), – С. 35-39.

2. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М.: ДМК Пресс, 2006. – С. 240.

3. Документація Simulink: URL: https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html. (дата звернення: 29.10.2020).

4. Система конечноэлементных расчётов FEMLAB 3.x. Документация. URL: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/2_1_4.php (дата звернення: 4.11.2020).

References

1. Annenkov A. N. Analyz teplovoho polia na postoiannikh mahnytakh s prymenenyem obratnikh sviazei po temperaturam / A. N. Annenkov, S. S. Akymov // Эnerhyia- XXI vek / Zhurnal. – Voronezh: 2013, – №1 (84), – S. 35-39.

2. Basov K. A. ANSYS y LMS Virtual Lab. Heometrycheskoe modelyrovanye. – M.: DMK Press, 2006. – S. 240.

3. Dokumentatsiya Simulink: URL: https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html. (data zvernennia: 29.10.2020).

4. Systema konechnoelementnikh raschetov FEMLAB 3.x. Dokumentatsyia. URL: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/2_1_4.php (data zvernennia: 4.11.2020).

Надійшла / Paper received : 06.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-146-150
УДК 621.317.73

А.С. КАШТАЛЬЯН, Д.А. МАКАРИШКІН, В. Г. РУБЦОВ, А.О. РУБЦОВА
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОШУКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ПОШКОДЖЕНЬ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

В статті наведено дослідження методів пошуку автоматизованих систем моніторингу та контролю пошкоджень кабельних ліній. Представлені результати дослідження, встановлюють, що методи пошуку автоматизованих систем моніторингу та контролю пошкоджень кабельних ліній характеризуються низькою точністю визначення дальностей до декількох пошкоджень у низькочастотних провідних лініях передачі, тому існуючі методи не мають можливість дозволити ефективно вирішувати задачу пошуку та ідентифікації пошкоджень кабельних низькочастотних ліній зв'язку.

Ключові слова: автоматизована система моніторингу та контролю, методи пошуку, методи вимірювання, пошкодження, кабельні лінії.

A. S. KASHTALIAN, D.A. MAKARYSHKIN, V.H. RUBTSOV, A.O. RUBTSOVA
Khmelnitsky national university

RESEARCH OF METHODS OF SEARCH FOR AUTOMATED SYSTEMS OF MONITORING AND DAMAGE CONTROL OF CABLE LINES

The paper presents a study of methods for finding automated systems for monitoring and controlling damage to cable lines. The presented results of the research establish that the methods of searching for automated systems for monitoring and controlling damage to cable lines are characterized by low accuracy in determining the distances of several interferences in low-frequency transmission lines, so the existing methods cannot be improved. language. The study of voltage measurement methods showed that all methods can be divided into analog and digital methods, and digital methods can provide the greatest accuracy and speed.

As a result of the study of known methods of measuring the distances of automated systems for monitoring and controlling damage to cable lines, it was found that known methods do not allow to effectively solve the problem of finding and identifying damage to low-frequency cable lines.

Studies of voltage measurement methods have shown that all methods can be divided into analog and digital methods, and digital methods can provide the highest accuracy and speed. Analog methods correspond to those measurement methods that are applied to all continuous values of input constant and variable signals. The digital method is suitable for discrete signal values. All analog and digital methods are divided into methods for measuring constant values and methods for measuring variable signals.

Key words: automated monitoring and control system, search methods, measurement methods, damage, cable lines.

Вступ

Актуальність виміру характеристик ліній зв'язку зумовлена необхідністю швидко визначити параметри провідних кабельних ліній та визначити відстань пошкодження з найменшою похибкою, ніж передбачають сучасні методи для цих ліній низької частоти.

Немає сумнівів, що необхідні дослідження для автоматизованого контролю параметрів лінії, щоб мати можливість контролювати стан провідної лінії та швидко і точно визначати відстань до пошкодження у разі пошкодження провідної лінії [1, 2], тому актуальною проблемою є вивчення відомих методів визначення відстані пошкодження у кабельних ліній автоматизованими системами їх контролю, електропередачі визначення функцій цих методів для автоматизованих систем моніторингу та контролю пошкоджень кабельних ліній.

На провідній лінії зв'язку припадає значна частина існуючої системи передачі інформації, що обумовлено зручністю, високою ефективністю та постійним імпедансом провідної лінії в процесі підключення. Постійне збільшення потоку інформації свідчить про важливість контролю за дотриманням параметрів провідної лінії зв'язку та заданих параметрів, що визначає якість передачі інформації від пристрою, що передає, до приймача.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відповідно до призначення кожен тип провідної лінії зв'язку має різні вимоги, які можна розділити на такі [3]: функціонування, експлуатація, а також технологія та економія.

Кабель передачі даних особливо важливий для системи передачі даних. За відсутності спеціального методу захисту цілісності інформації втрати передачі даних кожного символу телефонної провідної лінії становлять 10^{-3}-10^{-5} біт, тоді як втрати передачі даних кожного символу багатьох каналів зв'язку становлять 5×10^{-2} особи. Для більшості сучасних ліній зв'язку частота помилок не повинна перевищувати 10^{-5}-10^{-9} біт [4]. Це вимагає використання контролю якості та швидких методів виявлення несправностей.

Слід також пам’ятати, що розташування провідної лінії зв'язку необхідно визначати відповідно до найменш ускладнених умов, умов експлуатації, кліматичних умов та вимог в процесі будівництва, щоб мінімізувати витрати на захист кабелів від різних видів впливів та механічних впливів [5]. Тому найчастіші

провідні лінії зв'язку, тобто кабельні лінії, розташовані у важкодоступних місцях, таких як під землею, що обмежує використання методів усунення несправностей при контакті та значно збільшує потребу у виконанні операцій з пошуку та заміни пошкоджених ділянок час.

Під впливом різних зовнішніх і внутрішніх факторів внутрішня структура виробничої провідної лінії змінилася, тобто пошкодилися. Для кожного відомого типу трубопроводу різні типи пошкоджень, які можуть виникнути в трубопроводі під час його експлуатації, є більш-менш ефективними. Основними видами похибок та втрат, що сталися, є [1]:

- замикання між жилами або між жилою та екраном та обриви (так звані "кінцеві" пошкодження);
- зміна фізичних параметрів лінії, таких як поздовжній опір, зміна ємності або опору між жилами ("часткові" пошкодження).

Виклад основного матеріалу дослідження

Існуючі методи керування та виміру високочастотних ліній зв'язку мають можливість дозволити забезпечити досить хороші характеристики для контролю вимірюваних значень. Низькочастотна лінія в основному представлена коаксіальною лінією телефонної провідної лінії. Як і високочастотні лінії, ці провідні лінії також повинні контролюватися.

Для вирішення проблеми виміру відстані пошкодження існує велика кількість приладів, заснованих на використанні одного з вищезазначених методів (як правило, імпульсного). Далекоміри, засновані на вимірюванні фазового зсуву, ще не знайшли широкого практичного застосування. Пристрої, які засновані на виявлені імпульсних ліній, набули все більшого поширення [6, 7]. Тільки за допомогою наступних технічних засобів для поліпшення його характеристик: підвищення чутливості, збільшення потужності виявленого імпульсного електричного сигналу, використання спеціальної форми електричного сигналу, виконання математичної обробки, використання інформації статистичної обробки (фільтрації, апроксимації, відновлення), оцінка параметрів електричного сигналу (таких як амплітуда, електричний сигнал затримки). Загальні параметри обладнання наведені в таблиці.

Далекоміри, засновані на вимірюванні фазового зсуву, не дуже поширено використовуються, ці пристрої надають свої параметри лише за таких умов:

- низьке затухання у високочастотному діапазоні;
- точним визначенням інтервал часу між сформованим сигналом та відгуком, отриманим від лінії.
- у міру підсилення затухання електричного сигналу стає важче проводити вимір на великі відстані.

Використання імпульсного обладнання в лініях передачі низької частоти обмежується такими факторами:

- у порівнянні з радіочастотною лінією, для зменшення тривалості електричного сигналу необхідно більше послаблення сигналу;
- у деяких випадках обмежена смуга пропускання провідної лінії може значно скоротити відстань для проведення вимірювання.

Відповідно до цього, можна констатувати, що на сьогодні проблема виміру дальностей у низькочастотних лініях передачі залишається актуальною.

Як зазначалося вище, проблема визначення відстані до об’єкта відома давно[8, 9]. Визначивши відстань до об’єктів, що використовуються при радіолокаційних та геодезичних зйомках, можна досягти найбільшого практичного розвитку в цьому напрямку.

На передньому плані є велике обмеження - всі об’єкти знаходяться в одновимірному просторі. Тому неможливо безпосередньо застосувати більшість з цих методів до ліній зв'язку.

В даний час відомі методи визначення пошкоджень на лініях передачі [10, 11] засновані на вимірюванні різних фізичних параметрів провідній лінії або вимірювального електричного сигналу (часу відображення або електричного сигналу виявлення та електричного сигналу відображення, зміщення фаз).

За часом виміру, методи виміру відстані можна розділити на дві групи:

- виміру динамічних параметрів (виміру величин, що змінюються з часом);
- виміру статичних параметрів (виміру величин, значення яких є постійними протягом усього часу вимірювання).

Слід зазначити, що якщо межа зміни виміряного значення менше чутливості вимірювального пристрою, виміряне значення можна вважати постійним протягом часу вимірювання. Розглянемо переваги та недоліки кількох основних методів визначення відстані пошкодження.

Метод виміру опору жил є найпростішим методом визначення пошкодження у лінії. Він має підґрунтя на вимірювані опорів двох жил провідної лінії за допомогою мостової схеми [11].

Опір відрізків L_x та L_y пропорційна довжині відповідних жил, то з умов рівноваги моста отримаємо рівняння:

$$L_x = 2L\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

де R_1, R_2 - опір резисторів моста; L - довжина лінії.

З вище вказаного можна визначити наступні переваги методу:

- для виміру використовується мостова схема;
- використання постійного струму у вимірювальній системі дозволяє значно зменшити вимоги до технічної реалізації вузлів приладів.

Визначення статичних параметрів у процесі виміру призводить до таких істотних недоліків:

- немає можливості визначити характер пошкодження (метод дозволяє визначити лише коротке замикання сердечника на корпус або на інший сердечник через деякий опір);
- неможливість розрізнити кількість пошкоджень;
- потреба вживати для виміру двох приладів та доступу до двох сторін лінії.

Відомо, що характеристики та властивості об'єктів відображаються у характеристиках процесів, які відбуваються у об'єкті протягом деякого часу як реакція на зовнішній вплив [10]. Одним з таких впливів на досліджуваний об'єкт, є вплив електромагнітною хвилею, і як результат хвиля, яка створена досліджуваним об'єктом несе інформацію про його внутрішню структуру.

Суть методу імпульсної рефлектометрії полягає у визначенні часу між зондуючим імпульсом та імпульсами, які утворюються при відбитті від пошкоджень, які розташовані у провідній лінії [10]. Далі визначаються параметри, які змінюються під час виміру, а саме час появи сигналу відбиття та його амплітуда у кожний момент часу.

Характер рефлетограми залежить від еквівалентних складових провідної лінії (ємності C та індуктивності L).

Час проходження електричного сигналу t в провідній лінії визначає дальність до кожного пошкодження l. Дальність можна знайти як:

$$l = \frac{v \cdot t}{2},$$

де v - швидкість поширення електричного сигналу в лінії;

t - час появи відбитого сигналу. Основні параметри, що можна визначити, це:

- час появи відбитого імпульсу відносно початку подачі імпульсу в лінії (час визначає дальність від початку провідної лінії до пошкодження, яка створила це відбиття);
- амплітуда імпульсу (відносне значення);
- тип пошкодження, що можна визначити за формою електричного сигналу

Переваги цього методу полягають у:

- визначенні практично необмеженої кількості пошкоджень у провідній лінії через динамічне визначення зміни параметрів прийнятого електричного сигналу (рефлексу) з провідної лінії у часі;
- вимірі лише з однієї сторони лінії.

У такому процесі явище дисперсії призводить до збільшення часів зростанню та падінню попереднього фронту, тоді як амплітуда самого електричного сигналу одночасно зменшується. Оскільки вплив дисперсії пропорційний відстані, яку проходить сигнал, і частоті самого електричного сигналу, обмежить максимальну частоту виявленого сигналу. Тому, щоб отримати точні результати, потрібно:

- формувати сигнали тривалістю у сотні або десятки;
- забезпечити максимально короткі фронти імпульсів;
- знаходити часовий проміжок між сформованим сигналом та отриманим відгуком з кабельної лінії;
- збільшення чутливості вимірювача внаслідок збільшення затухання у кабельній лінії при збільшені і частоти електричного сигналу.

Для точного вимірювання відстаней в кабельних лініях потрібно вимірювати діючі значення напруги зондувального сигналу,тому розглянемо деякі методи вимірювання.

Всі методи вимірювання напруги можна розділити на аналогові та цифрові. Аналогові методи відповідають тим методам вимірювання, які застосовані до всіх безперервних значень вхідних постійних та змінних сигналів. Цифровий метод підходить для дискретних значень сигналу. Всі аналогові та цифрові методи поділяються на методи вимірювання постійних значень та методи вимірювання змінних сигналів. Характеристиками вимірювального змінного сигналу, є деякі характерні параметри: значення амплітуди напруги, випрямлене ефективне значення або ефективне значення. Унікальність цифрового методу вимірювання напруги змінного струму полягає в тому, що для вимірювання інваріантність сигналу повинна забезпечуватися протягом певного часу вимірювання. Аналоговий метод поділяється на електромеханічний та електронний метод. Електронний метод використовує електромеханічне обладнання для безпосереднього вимірювання напруги сигналів змінного струму та постійних сигналів. Електронний метод використовує електронні схеми для попереднього перетворення сигналу змінного струму в постійний сигнал, а потім використовує електромеханічне обладнання для вимірювання постійне напруги. Цифрові методи вимірювання постійної напруги поділяються на паралельне, послідовне, послідовне наближення та подвійне інтегрування. Для вимірювання параметрів сигналу змінного струму цифровим методом викопристовується електронна схема, аналогічна тій, що використовується в аналоговому методі

вимірювання напруги зміного струму, для попереднього перетворення сигналу в сигнал постійного струму, а потім вимірюється напруга постійного струму цифровим методом.

Наведену узагальнену класифікацію методів вимірювання напруги представлену на рисунку 1.

З вищезазначених досліджень методу вимірювання напруги можна зробити висновок, що завдяки використанню електромеханічних вимірювальних приладів точність методу моделювання є низькою, а час вимірювання довшим. Тому недоцільним є подальше вдосконалення методу моделювання.

З точки зору розвитку цифрові методи є більш перспективними. Однак обмеження пов'язано з тим, що цифровий метод використовується для вимірювання параметрів змінного сигналу, тобто схема випрямлення використовується для перетворення параметрів, в константу заздалегідь, що спричинене неправильним відтворенням математичної моделі.

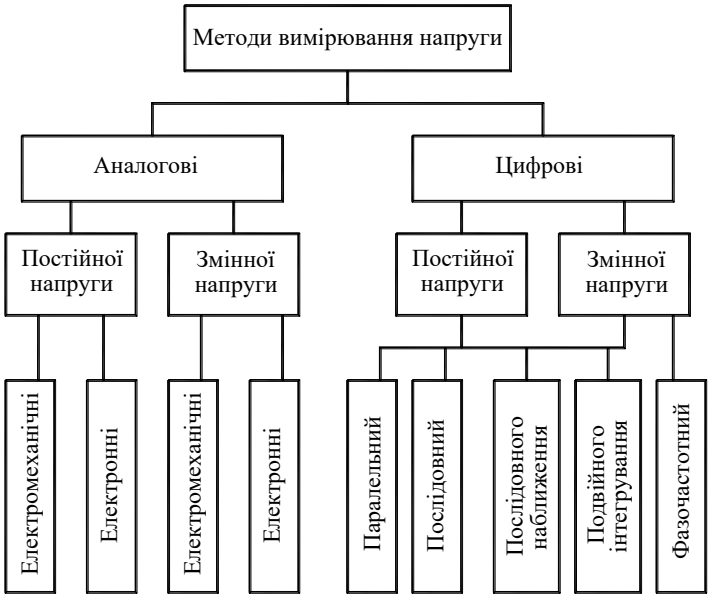


Рис. 1. Узагальнена класифікація методів вимірювання напруги

Тому необхідно детально розглянути гармонічний сигнал, щоб встановити функцію вимірювання середньоквадратичного значення, щоб розробити нову математичну модель вимірювання, яка не використовує електронну схему випрямляча, а перетворює сигнал у форму, що дозволяє отримати більше інформації.

Розглядаючи гармонічний сигнал як вектор, який обертається із заданою кутовою швидкістю, можна побачити, що більше інформації можна получити, перетворивши значення прикладеної напруги у фазовий зсув. Тому пропонуються подальші дослідження в напрямку пошуку методу перетворення значення напруги гармонічного сигналу у фазовий зсув.

Висновки

В результаті проведеного дослідження відомих методів виміру дальностей автоматизованих систем моніторингу та контролю пошкоджень кабельних ліній, встановлено, що відомі методи не мають можливість дозволити ефективно вирішити задачу пошуку та ідентифікації пошкоджень кабельних низькочастотних ліній зв'язку.

Відомі методи пошуку автоматизованих систем моніторингу та контролю пошкоджень кабельних ліній характеризуються низькою точністю визначення дальностей до декількох пошкоджень у низькочастотних кабельних ліній передачі.

Дослідження методів вимірювання напруги довели, що всі методи можна розділити на аналогові та цифрові методи, а цифрові методи можуть забезпечити найбільшу точність і швидкість.

Література

1. Chuck Lane, A 10-bit 60 Msps Flash ADC, Proceedings of the 1989 Bipolar Circuits and Technology Meeting // IEEE Catalog No. 89CH2771-4, September 1989, pp. 44-47.

2. F.D. Waldhauer, Analog to Digital Converter, U.S. Patent 3-187-325, 1965.

3. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для радиотехнических вузов/ Под ред. В.И. Винокурова.– 2–е изд. перераб. и доп.– М.: «Высш. шк.», 1986. – 351 с.

4. Гойжевский В.А., Дворский В.Я., Трилис В.Г., Шарпан О.Б. Исследование линейних четирёхполюсников с помощью дискретного множества частот. //Радиотехнические измерения в физических исследованиях. - М: «Наука», 1977. - С. 57-60.

5. Дворский В.Я., Трилис В.Г. Цифровая индикация в системе измерения времени распространения сигналов. // Радиотехнические измерения в физических исследованиях. : М «Наука», 1977. - С. 60-63.

6. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) - К.:Выща школа, 1986. -504с.

7. Измерения в электронике: Справочник /В.А.Кузнецов, В.А.Долгов, В.М. Коневских и др.; Под. ред. В.А.Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 512: ил.

8. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов.-М.:Радио и связь. –1985. – С. 386.

9. Поліщук Е.С., Дорожовець М.М., Ящук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник/ Е.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Ящук, В.М. Ванько, Г.Т.Бойко; За ред.проф. Е.С.Поліщука – Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2003. – С. 544.

10. Шведский Б.И. Электронные цифровые приборы: 2-е.изд.перераб. и допол., 1991. – С. 191.

11. Троянов Г.Ю., Троцишин І.В. Огляд методів вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали VI наук. - техн. конф.- Хмельницький: ТУП, 1999. – С. 91.

References

1. Chuck Lane, A 10-bit 60 Msps Flash ADC, Proceedings of the 1989 Bipolar Circuits and Technology Meeting // IEEE Catalog No. 89CH2771-4, September 1989, pp. 44-47.

2. F.D. Waldhauer, Analog to Digital Converter, U.S. Patent 3-187-325, 1965.

3. Vynokurov V.Y., Kaplyn S.Y., Petelyn Y.H. Эlektroradyoyzmerenyia: Ucheb. posobye dlia radyotekhnycheskykh vuzov/ Pod red. V.Y. Vynokurova.– 2–e yzd. pererab. y dop.– M.: «Vыssh. shk.», 1986. – 351 s.

4. Hoizhevskyi V.A., Dvorskyi V.Ia., Trylys V.H., Sharpan O.B. Yssledovanye lyneinykh chetyrëkhpoliusnykov s pomoshchiu dyskretnoho mnozhestva chastot. //Radyotekhnycheskye yzmerenyia v fyzycheskykh yssledovanyiakh. - M: «Nauka», 1977. - S. 57-60.

5. Dvorskyi V.Ia., Trylys V.H. Tsyfrovaia yndykatsyia v systeme yzmerenyia vremeny rasprostranenyia syhnalov. // Radyotekhnycheskye yzmerenyia v fyzycheskykh yssledovanyiakh. : M «Nauka», 1977. - S. 60-63.

6. Ornatskyi P.P. Avtomatycheskye yzmerenyia y pryborы (analohovыe y tsyfrovыe) - K.:Vыshcha shkola, 1986. -504s.

7. Yzmerenyia v эlektronyke: Spravochnyk /V.A.Kuznetsov, V.A.Dolhov, V.M. Konevskykh y dr.; Pod. red. V.A.Kuznetsova. – M.: Эnerhoatomyzdat, 1987. – S. 512: yl.

8. Kukush V.D. Эlektroradyoyzmerenyia: Uchebnoe posobye dlia vuzov.-M.:Radyo y sviaz. –1985. – S. 386.

9. Polishchuk E.S., Dorozhovets M.M., Yashchuk V.O. ta in. Metrolohiia ta vymiriuvalna tekhnika: Pidruchnyk/ E.S.Polishchuk, M.M.Dorozhovets, V.O.Iashchuk, V.M. Vanko, H.T.Boiko; Za red.prof. E.S.Polishchuka – Lviv: Vydavnytstvo "Beskyd Bit", 2003. – S. 544.

10. Shvedskyi B.Y. Эlektronnыe tsyfrovыe pryborы: 2-e.yzd.pererab. y dopol., 1991. – S. 191.

11. Troianov H.Iu., Trotsyshyn I.V. Ohliad metodiv vymiriuvannia amplitudy zminnoi napruhy synusoidalnoi formy//Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh: Materialy VI nauk. - tekhn. konf.- Khmelnytskyi: TUP, 1999. – S. 91.

Надійшла / Paper received : 07.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-151-155
УДК 621.391.8

Д.В. МИХАЛЕВСЬКИЙ, О.С. ГОРОДЕЦЬКА
Вінницький національний технічний університет

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ АЛГОРИТМІВ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ АБОНЕНТЬКИХ ПРИСТРОЇВ СТАНДАРТУ 802.11

У статті досліджується оцінка достовірності вимірювання основних параметрів безпровідних каналів за допомогою алгоритмів моніторингу на базі абонентських пристроїв стандарту 802.11. Також, визначено вимірювальні можливості абонентських пристроїв та доцільність їх застосування для технічної діагностики безпровідних каналів стандарту 802.11.

На основі статистичних оцінок та критеріїв Колмогорова-Смірнова і Шапіро-Уілка, встановлено, що для визначення довіркових інтервалів, можна використовувати нормальний закон розподілу. При цьому отримуються наближені результатів. Дослідження на основі функції Лапласа, коефіцієнта Стьюдента та розподілу χ^2 показали, що розподіл для вимірювальних величин має найбільше наближення до χ^2. Але, якщо враховувати флуктуації основних параметрів, то для потужності сигналу на вході приймача довіркові інтервали будуть становити не більше ±0,3 дбм при умові періоду спостереження рівному 360 с із циклом моніторингу 1с. Для інформаційних параметрів процес оцінювання довіркових інтервалів показав значення не більше ± 0,04 Мб/с для ефективної швидкості передачі інформації, та не більше ±7 МБ/с для пропускної здатності каналу. Також, встановлено, що для інформаційних параметрів достатньо використовувати 50 вимірів. При цьому, розподіл буде більш наближений до χ^2, але враховуючи малі значення довіркового інтервалу та особливості передачі пакетів за допомогою кадрів стандарту 802.11, різниця між нормальним розподілом майже не вплине на кінцевий результат.

Використання отриманих результатів, дозволяє використовувати їх для оцінки ступеня адекватності моделей та достовірності методів оцінювання основних параметрів безпровідних каналів для етапів проектування та експлуатації мереж стандарту 802.11.

Ключові слова: достовірність,безпровідний канал стандарту 802.11, ефективна швидкість передачі інформації, потужність сигналу на вході приймача, безпровідні мережі.

D.V. MYKHALEVSKIY, O.S. HORODETSKA
Vinnytsia National Technical University

ASSESSMENT OF RELIABILITY OF MONITORING ALGORITHMS FOR SUBSCRIBER DEVICES 802.11 STANDARD

The article investigates the assessment of the reliability of measuring the main parameters of wireless channels using monitoring algorithms based on 802.11 subscriber devices. Also, the measuring capabilities of subscriber devices and the feasibility of their use for technical diagnostics of wireless channels of the 802.11 standard are determined.

Based on statistical estimates and Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk criteria, it was found that a normal distribution law can be used to determine confidence intervals. This gives approximate results. Studies based on the Laplace function, Student's coefficient and the distribution of $\chi 2$ have shown that the distribution for the measured quantities has the closest approximation to $\chi 2$. However, if the fluctuations of the main parameters are taken into account, the reference intervals for the signal power at the receiver input will be no more than ± 0.3 dBm, provided that the observation period is 360 s with a monitoring cycle of 1 s. For information parameters, the process of estimating the confidence intervals showed values of not more than ± 0.04 Mb / s for the effective data rate, and not more than ± 7 MB / s for channel bandwidth. Also, it is established that it is enough to use 50 measurements for information parameters. In this case, the distribution will be closer to $\chi 2$, but given the small values of the confidence interval and the peculiarities of packet transmission using 802.11 frames, the difference between the normal distribution will have almost no effect on the final result.

The use of the obtained results allows to use them to assess the degree of adequacy of the models and the reliability of the methods of estimating the basic parameters of wireless channels for the stages of design and operation of 802.11 networks.

Keywords: reliability, wireless channel 802.11 standard, effective data rate, signal power at the receiver input, wireless networks.

Вступ

Останнім часом досить широкого поширення отримали безпровідні мережі сімейства стандартів 802.11x [1]. Такі мережі є економічно вигідними та простими у побудові та обслуговуванні і мають досить високу пропускну здатність каналів. Але за рахунок використання малопотужних передавачів із низьким рівнем випромінювання існує значна кількість постійних та випадковий факторів, які можуть погіршувати ефективність безпровідних каналів [2]. Найбільш достовірним способом оцінки таких факторів є експериментальні дослідження та створення на їх базі емпіричних моделей [3]. Застосування таких моделей дає можливість прогнозувати ефективність каналів як для стаціонарних, так і для мобільних абонентів, на етапах проектування та експлуатації мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Радіомоніторинг можна використовувати для оцінки параметрів сигналу та пропускної здатності безпровідних каналів в межах будинку як показано у роботі [4]. На основі досліджень встановлено, що використання апаратно-програмних можливостей мобільних пристроїв може бути альтернативою спектроаналізаторам, коли не є необхідним отримання повної інформації про спектр. У роботі [5], показано, що оцінка пропускної здатності безпровідних каналів стандарту 802.11 є досить складним процесом. Тут запропоновано два методи де використовується оцінка пропускної здатності за допомогою оцінки помилок у

пакетах із новим алгоритмом перемежування. Таким чином, інформацію про параметри безпровідних каналів можна отримати на основі алгоритмів моніторингу, що використовують вимірювання за певний цикл моніторингу. Часові характеристики параметрів каналу мають випадковий характер [6], тому необхідно використовувати період спостереження та статистичну обробку результатів вимірювання. Тоді, для оцінки адекватності емпіричних моделей оцінювання основних параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11 із використанням апаратно-програмних алгоритмів моніторингу на базі абонентських пристроїв [7], необхідно мати оцінку достовірності таких вимірювань. В свою чергу, достовірність моделей оцінювання основних діагностичних параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11 можна поділити на три складові: достовірність результатів емпіричних досліджень на основі яких отримані математична моделі; достовірності вимірювання параметра P_m, що буде залежати від характеристик обладнання стандарту 802.11 у різних виробників; достовірність оцінювання інтервалів ΔP і ΔV, для врахування факторів впливу. Тому, є актуальним оцінити вимірювальні можливості існуючих абонентських пристроїв та доцільність їх застосування для технічної діагностики безпровідних каналів стандарту 802.11.

Метою роботи є оцінка достовірності вимірювання основних параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11 на базі алгоритмів моніторингу та абонентських пристроїв шляхом статистичного аналізу.

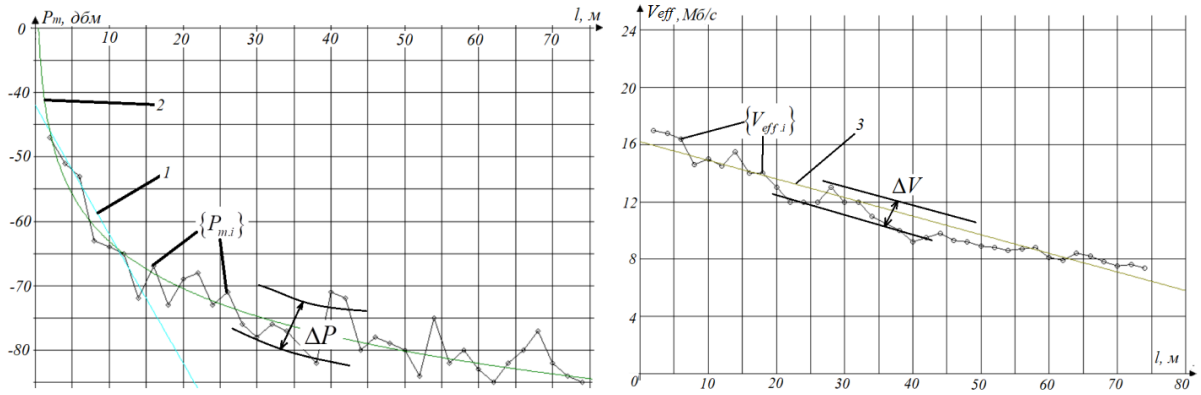
Виклад основного матеріалу дослідження

Вимірювання основних параметрів безпровідних каналів стандарту 802.11 виконується на основі алгоритмів моніторингу та обчислення середньостатистичних значень за період спостереження. Оцінку таких параметрів можна отримати на основі виразів [3]:

$$P_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}, \qquad V_{eff} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} V_{eff.i}, \tag{1}$$

де n і m – кількість циклів вимірювання протягом періоду спостереження для потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації відповідно. $P_{m.i}$ – вимірювання потужності сигналу за час одного циклу моніторингу; $V_{eff.i}$ – вимірювання ефективної швидкості передачі інформації за час одного циклу моніторингу.

Визначимо достовірність оцінювання основних параметрів каналу, що отримуються на основі виразів (1). Для цього, скористаємось результатами емпіричних досліджень у роботі [8], як показано на рис. 1.

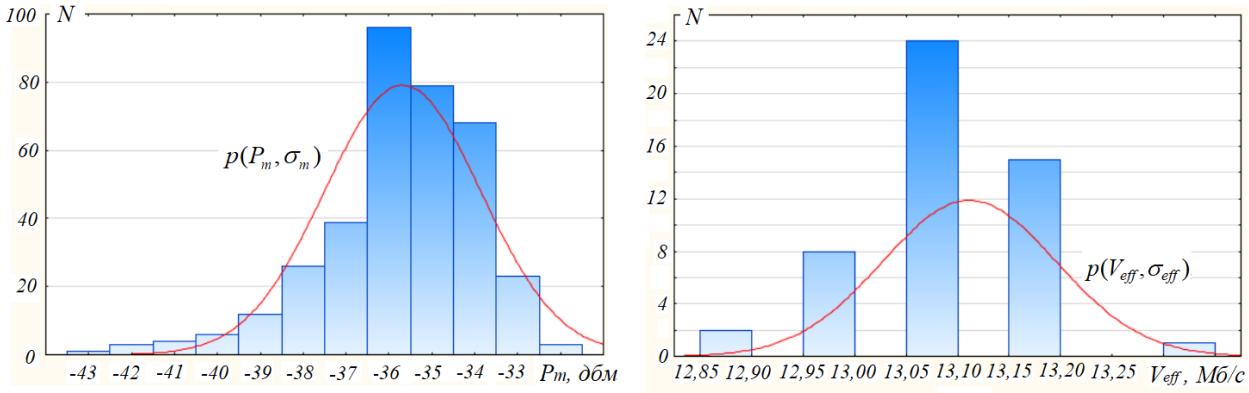


а б

Рис. 1. Результати емпіричних досліджень для безпровідного каналу стандарту 802.11ас для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

На рис. 1 показано результати досліджень для каналу стандарту 802.11ас зі смугою 40 МГц, які отримані за допомогою абонентського мобільного пристрою. За допомогою регресійного аналізу отримується усереднена модель оцінювання діагностичних параметрів по всій довжині каналу [2]. В загальному можна виділити короткі канали, де основні діагностичні параметри можна описати лінійним рівнянням регресії (крива 1 на рис. 1, а), та довгі – потужність сигналу має логарифмічну модель (крива 2). Відхилення від усередненого значення можна оцінити за допомогою інтервалів ΔP і ΔV, до яких можна не пред'являти досить високу точність та використовувати математичне усереднення. Згідно роботи [6], кожному інтервалу ΔP можна співставити інтервал ΔV, тоді флуктуації сигналу у приміщенні від ±2 дбм при мінімальній дії факторів впливу та до ±5..10 дбм для значної кількості, приводять до флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації до ±0,1…0,5 Мб/с, в залежності від кількості існуючих факторів впливу в каналі.

Виконаємо статистичний аналіз множини значень випадкових величин $\{P_m\}_i$ і $\{V_{eff}\}_i$ та отримаємо розподіли, які наведено на рис. 2.



а б

Рис. 2. Гістограма розподілу для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

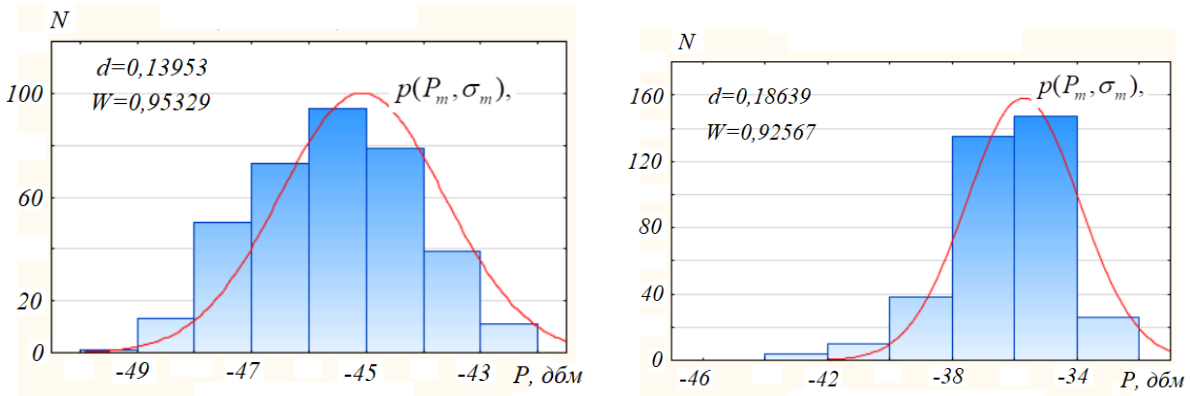
Криві $p(P_m, \sigma_m)$ та $p(V_{eff}, \sigma_{eff})$ показують передбачуваний нормальний закон розподілу. Спершу розглянемо потужність сигналу на вході приймача із аналізом отриманих значень $\{P_m\}_i$ контрольної відстані від точки доступу. Додатково використаємо незалежний стаціонарний пристрій стандарту 802.11n з каналом 40 МГц у діапазоні 2,4 ГГц. Результати статистичного аналізу при вимірюванні параметра P_m наведено у табл. 1.

Із наведеної таблиці видно, що коефіцієнти асиметрії та ексцесу наближаються до нуля, медіана та мода рівні між собою, а середнє значення майже таке ж саме. Тому, можна припустити про гіпотезу нормального закону розподілу $p(P_m, \sigma_m)$. Далі для перевірки даної гіпотези використаємо критерії Колмогорова-Смірнова (d) та Шапіро-Уілка (W). Аналіз за такими критеріями наведено на рис. 3.

Таблиця 1

Статистична оцінка результатів експерименту параметра P_m

Параметр	N	Середнє значення	Медіана	Мода	Дисперсія	Асиметрія	Помилка асиметрії	Ексцес	Помилка ексцесу
P_m (Пр1)	360	-45,07	-45	-45	2,05	-0,04	0,13	-0,5	0,25
P_m (Пр2)	360	-35,7	-36	-36	2,16	-0,94	0,13	1,47	0,25



а б

Рис. 3. Результати перевірки гіпотези нормального закону розподілу для: а – пристрою 1; б – пристрою 2.

Як видно із результатів на рис. 3, критерій Колмогорова-Смірнова наближається до нуля а критерій Шапіро-Уілка до одиниці. На основі цього, можна говорити про можливість використання нормального розподілу для визначення довіркового інтервалу та отримання наближених результатів. При існуванні наближення можна розглянути довіркові інтервали за трьома випадками: функція Лапласа, коефіцієнт Стьюдента та розподіл χ^2. Таким чином, довіркові інтервали для середньостатистичних значень потужності сигналу на вході приймача можна визначити на основі наступних виразів:

$$\sigma = \pm t \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{m.i}\right)}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} -\dfrac{\sqrt{\dfrac{n-1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i} - \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_{m.i}\right)^2}}{\chi_{\frac{1-\gamma}{2},n-1}}, \\ +\dfrac{\sqrt{\dfrac{n-1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(P_{m.i} - \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_{m.i}\right)^2}}{\chi_{\frac{1+\gamma}{2},n-1}}, \end{cases}$$

де γ – квантиль розподілу хі-квадрат; t – коефіцієнт Лапласа при відомій дисперсії або коефіцієнт Стьюдента при невідомій дисперсії.

Результати розрахунків за виразами (2) для імовірності 0,95 наведено у таблиці 2.

Як видно із результатів табл. 2, та враховуючи флуктуації сигналу, які спостерігаються на рис. 1 а, як ΔP, найбільш близьким буде розподіл χ^2. Але, якщо підвищити імовірність до 0,997 для оцінки за коефіцієнтом t, то можна отримати наближені результати, як показано в таблиці 3.

Таблиця 2

Результати оцінки довіркових інтервалів для імовірності 0,95

Довірковий інтервал	Пристрій 1 (дисперсія = 3,29)		Пристрій 2 (дисперсія =2,06)	
	$-\sigma$	$+\sigma$	$-\sigma$	$+\sigma$
t Лапласа	0,2	0,2	0,155	0,155
t Стьюдента	0,18	0,18	0,149	0,149
χ^2	1,69	1,96	1,34	1,55

Таблиця 3

Результати оцінки довіркових інтервалів для імовірності 0,997

Довірковий інтервал	Пристрій 1 (дисперсія = 3,29)		Пристрій 2 (дисперсія =2,06)	
	$-\sigma$	$+\sigma$	$-\sigma$	$+\sigma$
t	0,3	0,3	0,23	0,23

Таким чином, отримані результати показують можливість отримати довірковий інтервал в найгіршому випадку ±0,3 дбм, що є досить високим результатом, якщо порівнювати із існуючими флуктуаціями сигналів у просторі, навіть при мінімальній дії факторів впливу у приміщенні для прямої видимості.

Далі розглянемо параметри ефективної швидкості передачі інформації V_{eff} та пропускну здатність каналу на фізичному рівні V_{pl}. Параметр V_{eff} має набагато вищу складність оцінювання із застосуванням алгоритмів моніторингу та в багатьох випадках потребує значно більшого періоду спостереження. Цей параметр можна оцінювати як за допомогою додатків прикладного рівня, так і на основі моніторингу використовуючи статистику кількості вдало прийнятих та переданих кадрів [9]. Крім того, на рівні додатків прикладного рівня можна обмежитись кількістю вимірів $\{V_{eff}\}_i$ = 50, як показано на рис. 2 б. Результати статистичної обробки емпіричних досліджень для стандарту 802.11n 40 МГц [8] із достовірністю 0,95, наведено у табл. 4.

Таблиця 4

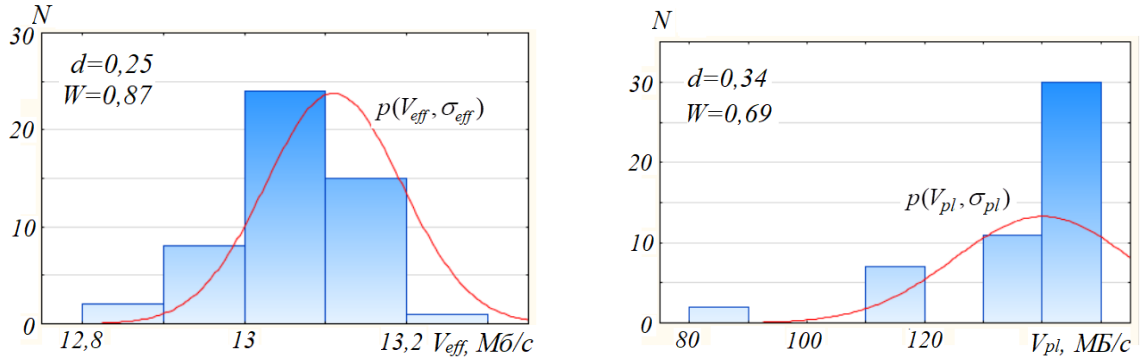
Статистична оцінка вимірювання ефективної швидкості передачі інформації для імовірності 0,95

Параметр	N	Середнє значення	Медіана	Мода	Дисперсія	Асиметрія	Помилка асиметрії	Ексцес	Помилка ексцесу
V_{eff}	50	13,11	13,1	13,1	0,007	-0,41	0,33	0,23	0,66
V_{pl}	50	140,1	150	150	226	-1,76	0,33	3,14	0,66
Параметр	$-\sigma(t)$		$+\sigma(t)$			$-\sigma(\chi^2)$		$-\sigma(\chi^2)$	
V_{eff}	0,037		0,037			0,02		0,034	
V_{pl}	6,5		6,5			3,52		6,13	

Як видно із отриманих результатів, аналогічно до параметра P_m, можна прийняти нормальний закон розподілу для визначення наближених значень довіркового інтервалу. Для ефективної швидкості передачі інформації інтевал складе не більше ± 0,04 Мб/с, а для пропускної здатності не більше ±7 МБ/с.

Оцінка критеріїв Колмогорова-Смірнова та Шапіро-Уілка наведено на рис. 4.

Отже, при використанні 50 вимірів для інформаційних діагностичних параметрів буде більше відхилення від нормального закону розподілу та більш наближене до розподілу χ^2. Але враховуючи малі значення довіркового інтервалу та особливості передачі пакетів за допомогою кадрів стандарту 802.11, таку гіпотезу можна приймати, що майже не вплине на кінцевий результат.



а б

Рис. 4. Результати перевірки гіпотези нормального закону розподілу для: а – ефективної швидкості передачі інформації; б – пропускної здатності каналу

Висновки

Проведені дослідження показали, що для оцінювання достовірності вимірювання основних параметрів безпровідних каналів можна приймати нормальний закон розподілу. В такому випадку довіркові інтервали будуть мати наближений характер. Встановлено, що для потужності сигналу на вході приймача (P_m) довіркові інтервали будуть становити не більше ±0,3 дбм при умові періоду спостереження рівному 360 с із циклом моніторингу 1с. Це є досить високим результатом, якщо порівнювати із існуючими флуктуаціями сигналів у просторі при дії різного роду факторів впливу де флуктуації становлять від ±2 дбм для прямої видимості в умовах приміщень [10]. Для інформаційних параметрів процес оцінювання є складнішим, тому тут достатньо проводити 50 вимірів і при цьому отримаємо інтервали не більше ± 0,04 Мб/с для ефективної швидкості передачі інформації (V_{eff}) та не більше ±7 МБ/с для пропускної здатності (V_{pl}).

References

1. Performance evaluation of IEEE 802.11 ah networks with high-throughput bidirectional traffic / D. Šljivo, L. Kerkhove, J. Tian, Famaey, A. Munteanu, I. Moerman, et al // Sensors. – 2018. – vol. 18, no. 2. – P. 1–28. DOI: 10.3390/s18020325

2. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the imput to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. / D. Mykhalevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. №6/9(96). – P. 16-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.

3. Mykhalevskiy D. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver / D. Mykhalevskiy, N. Vasylkivskiy, O. Horodetska // Easten-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 6/9(90). P. 38-43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.

4. Sârbu A. (2018). Non Wi-Fi Devices Interference Testing in a 2.4 GHz Wi-Fi Home / A. Sârbu, M. Sârbu, C. Șumălan // Land Forces Academy Review. – 2018. – №23(90). – P. 143–150. **DOI:** 10.2478/raft-2018-0017.

5. Khan M. O. (2016). Accurate WiFi packet delivery rate estimation and applications / M. O. Khan, L. Qiu // IEEE INFOCOM - The 35th Annual IEEE. – 2016. – P. 1-9. DOI:10.1109/infocom.2016.7524394.

6. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band / D. V. Mykhalevskiy // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2019. – № 1. – P. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004.

7. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers / D. V. Mykhalevskiy, O. S. Horodetska // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD). – 2019. – №42(2). – P. 50–57. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57.

8. Mykhalevskiy D. Development of the method of evaluation of effective data rate on the basis of empirical model of statistical relationship of basic parameters for the wireless channel 802.11 standard /D. Mykhalevskiy// Easten-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 5/9 (107). – P. 26–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.

9. Mykhalevskiy, D. V., Kychak V. M. Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard / D. V. Mykhalevskiy, V. M. Kychak // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2019. – №2. – P. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009.

10. Mykhalevskiy D. V. Investigation of sensitivity impact of receiver to effective data transmission rate / D. V. Mykhalevskiy // Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. – 2016. Lviv, Ukraine. – P. 369-372.

Надійшла / Paper received : 06.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-156-160
УДК 621.382

Г.І. БАРИЛО, І.І. ГЕЛЬЖИНСЬКИЙ, Р.Л. ГОЛЯКА, Т.А. МАРУСЕНКОВА
Національний університет «Львівська політехніка»

СИГНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

В роботі наведено вирішується задача розроблення універсального сигнального перетворювача для побудови інтегрованих сенсорів в концепції синтезу даних (Data Fusion). Використання розробленого конвертора забезпечує широку функціональність щодо поєднання різних методів вимірювального перетворення та відповідність сучасним тенденціям розвитку мікроелектронної сенсорики.

Ключові слова: сенсор, злиття даних, сигнальний перетворювач, програмована система.

H.I. BARYLO, I.I. HELZHYNSKYY, R.L. HOLYAKA, T.A. MARUSENKOVA
Lviv Polytechnic National University

SIGNAL CONVERTER FOR MICROELECTRONIC SENSOR DEVICES

The present paper is devoted to the implementation of the signal converter of integrated sensors in the concept of data synthesis (Data Fusion), which is based on the process of integrating multiple data sources to obtain more consistent, accurate and useful information than that provided by any single data source. In sensory technology, the concept of data fusion involves the fusion of data of integrated heterogeneous sensors, ie different in essence measurement transformation of information sources. The problem of development of the universal hardware-software signal converter for construction of the integrated sensors is solved in work. The main requirements for such a transducer are a wide range of functionality for combining different methods of measuring transformation and compliance with modern trends in the development of microelectronic sensors. The functionality of the signal conversion is provided by the ability to implement the measurement conversion of the signal on the principle of "actuator-sensor" with different physical quantities - electric current, electric capacity, heat, light, magnetic field. Given the requirements for modern microcircuits, in particular for the sensing devices of the Internet of Things, the signal path of the synthesized sensors is implemented on the basis of PSoC family 5LP Family Cypress. The structure of the signal converter is developed on the basis of built-in PSoC elements which includes units of digital and analog systems, units of the microprocessor, matrices of volatile and nonvolatile memory, system resources, and also knots of programming and management of power consumption. To debug the developed hardware and software signal converter and implement integrated sensors based on it, software was developed with which you can perform dynamic reconfiguration of the system, specification of its components, set measurement modes and graphically display the results. Approbation of this system was carried out in the process of implementation of integrated sensors of thermal analysis, optoelectronics, magnetic tracking and impedance spectroscopy.

Keywords: sensor, Data Fusion, signal converter, programmable system.

Постановка проблеми

Основу сучасних мікроелектронних сенсорних пристроїв складають сигнальні перетворювачі, які реалізують вимірювальне перетворення сигналу з різними фізичними величинами – електричним струмом, електричною ємністю, теплом, світлом, магнітним полем тощо. Для забезпечення різних методів вимірювального перетворення та відповідно до сучасних тенденцій розвитку мікроелектронної сенсорики виникає потреба у створенні нових підходів побудови функціональних сигнальних перетворювачів.

Аналіз останніх джерел

Розвиток сучасної сенсорної техніки тісно пов'язаний з використанням новітніх технологій, зокрема, концепції інформаційних технологій – синтезу даних (Data Fusion) [1]. В узагальненому виді злиття даних представляється як процес інтеграції декількох джерел даних для отримання більш послідовної, точної та корисної інформації, ніж та, що надається будь-яким окремим джерелом даних [2]. Характерними прикладами галузей застосування технології злиття даних є системи прогнозування [3], розумні (смарт) повсюдні (всесущі) середовища (Smart Ubiquitous Environments), зокрема, Інтернет Речей IoT (Internet of Things) [4], системи навігації [5], засоби оброблення візуальної інформації, зокрема, в медицині [6], пристрої людино-машинного інтерфейсу та апаратура діагностики, зокрема, BCI (Brain Computer Interface) – інтерфейс мозок-комп'ютер [7] тощо.

В сенсорній техніці концепція злиття даних обумовила розвиток напрямку – синтез даних сенсорів (Sensor Data Fusion), чи в більш короткому понятті – синтез сенсорів (Sensor Fusion). Здебільшого під синтезом сенсорів розуміють злиття даних інтегрованих гетерогенних сенсорів (Heterogeneous Sensor Data Fusion), тобто різних за суттю вимірювального перетворення джерел інформації [8]. Серед основних тем наукових досліджень в цій галузі відзначимо: алгоритми злиття мультисенсорних даних [9], аналіз раціонального злиття суперечливих даних інтегрованих сенсорів [10], синтез мультисенсорних систем навігації [11] та моніторингу активності людей [12], алгоритмічні рішення та уніфікація фреймворку (Framework) інтегрованих сенсорів [13].

Визначальними вимогами до сучасних сенсорних пристроїв є відповідність їх сигнальних перетворювачів до концепції апаратно-програмної реалізації Систем на кристалі (Programmable System on Chip, PSoC) . Такі сенсорні сигнальні перетворювачі, сучасним варіантом назви яких є сенсорний фронт-енд (Sensor Front-End) повинні забезпечувати функціонування при низьких напругах живлення, мінімальне енергоспоживання, універсальність, стабільність функціонування при зміні зовнішніх факторів, rail-to-rail режими роботи тощо. Крім того, в світлі сучасних тенденцій розвитку інформаційних систем, нове

покоління сенсорних пристроїв має відповідати концепціям Лабораторії на чіпі (Lab-on-Chip) [14] та Інтернету Речей (IoT, Internet of Things) [15].

Метою роботи є: побудова універсального апаратно-програмного сигнального перетворювача на основі основі PSoC сімейства 5LP для реалізації технології синтезу даних шляхом інтеграції джерел даних з різними фізичними величинами.

Виклад основного матеріалу

У відповідності до сформульованої задачі в статті представлений подальший розвиток апаратно-програмних рішень синтезованих сенсорів на основі компонентів мікросхемотехніки. Враховуючи вимоги до сучасної мікросхемотехніки, зокрема до сенсорних пристроїв Інтернету Речей, сигнальний тракт синтезованих сенсорів реалізовано на основі PSoC сімейства 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation [16]. До структури PSoC входять вузли цифрових та аналогових систем, вузли мікропроцесора, матриці енергозалежної та енергонезалежної пам'яті, системні ресурси, а також вузли програмування та керування енергоспоживанням. Основою цифрових вузлів є матриця універсальних цифрових блоків, спеціалізованих цифрових блоків, зокрема для реалізації інтерфейсів, таймерів, широтно-імпульсних модуляторів тощо. Аналоговими вузлами PSoC є блоки на перемикальних конденсаторах та блоки з неперервним сигнальним перетворенням, зокрема: операційні підсилювачі, компаратори, джерела опорної напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплексори тощо. Вузли з'єднуються програмно конфігурованою мережею сигнальних ліній.

Визначальними компонентами системи PSoC5, на основі яких реалізовано сигнальний перетворювач (рис. 1), є: цифро-аналоговий перетворювач VDAC8, синтезуючий генератор Wave DAC8, таймер Timer, регістр керування Control Reg, подільник частоти Freq. Divider, мультифункціональний міксер Mixer, операційні підсилювачі Oamp, підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення PGA (Programmable Gain Amplifier), аналоговий мультиплексор AMux, аналого-цифрові перетворювачі ADC на основі дельта-сигма модулятора DelSig та регістра послідовного наближення SAR. Для реалізації ємнісних сенсорів використано компонент CapSense CSD, а сенсорів температури – компоненти вимірювального перетворення на терморезисторах RTD та термопарах Thermocouple.

З метою підвищення ефективності розробки високоточних сенсорів температури в системі PSoC5 передбачені компоненти вимірювального перетворення на терморезисторах RTD (рис. 2 а) та термопарах Thermocouple (рис. 2 б).

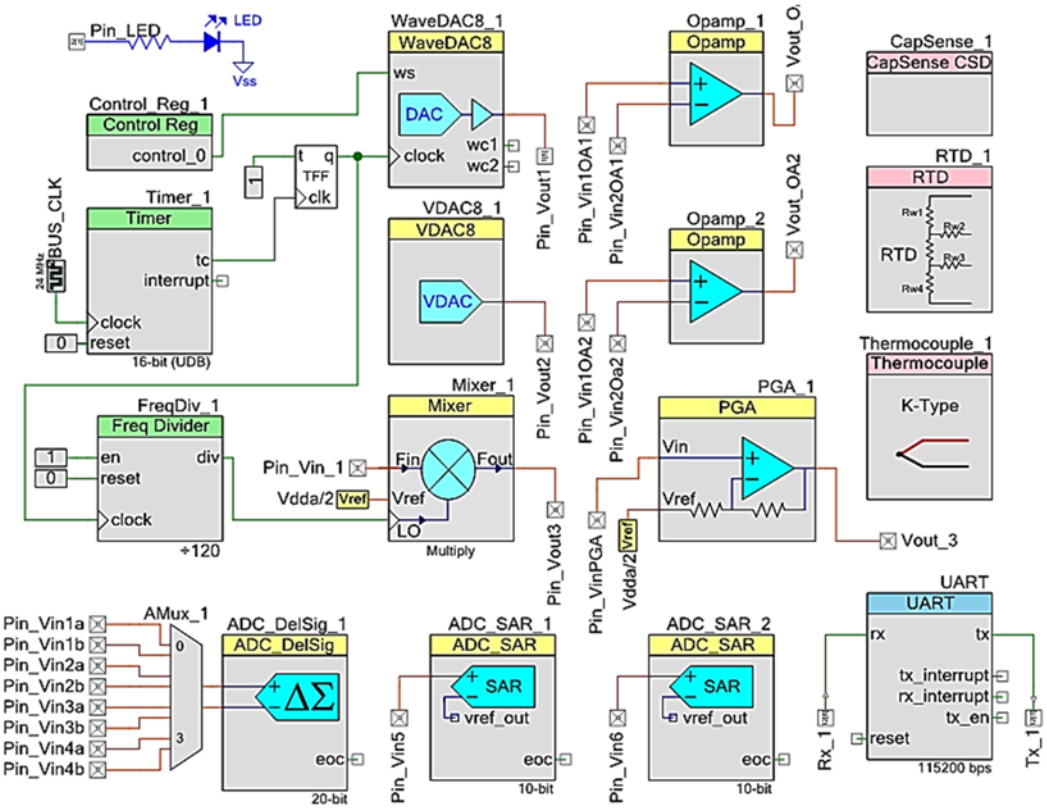
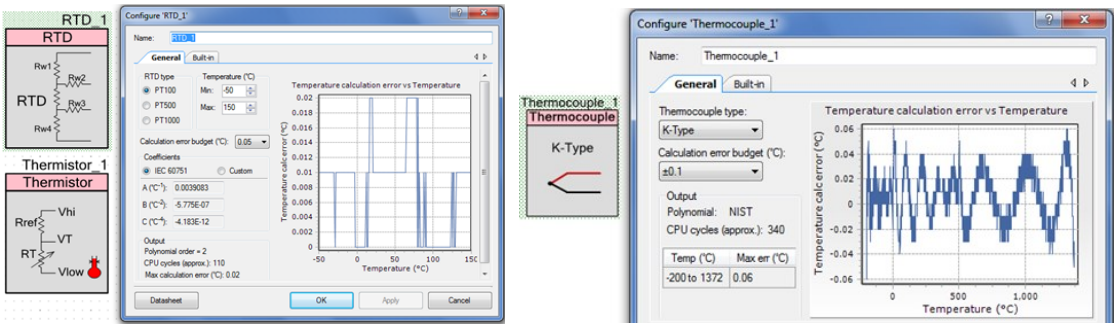


Рис. 1. Реалізація сигнального перетворювача на PSoC

Для підвищення точності вимірювання використовуються поліноміальна апроксимація функція перетворення. У вікнах конфігурування цих компонентів відображається розрахунок похибки вимірювання температурив залежності від діапазону вимірювання та параметрів апроксимації. Результат вимірювання температури отримується з використанням API функція та перетворень, зокрема: rtdRes = GetRTDRes(vRef); rtdTemp = RTD_GetTemperature(rtdRes); decTemp = rtdTemp/100; fracTemp = rtdTemp - (decTemp * 100).



а) б)

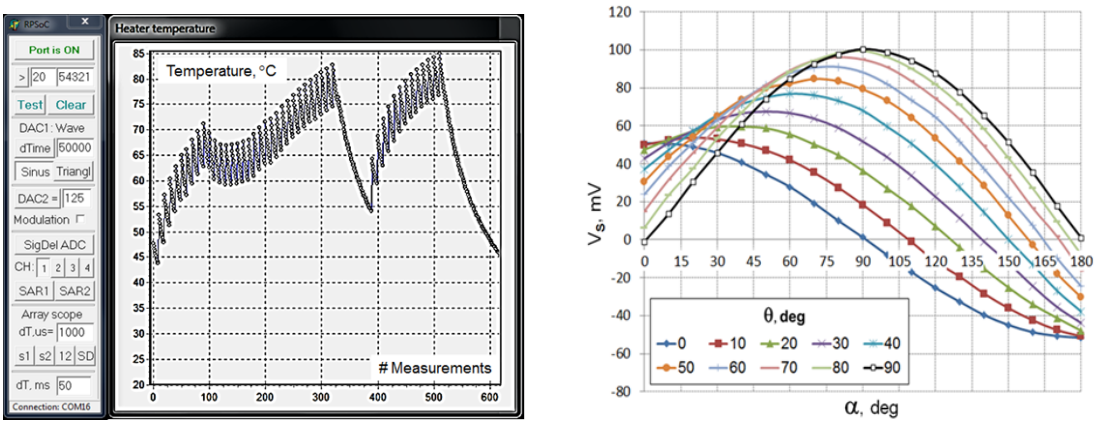
Рис. 2. Вигляд інтерфейсу налаштувань температурної корекції: : а) – на терморезисторах; б) – на термопарі

Експериментальні дослідження та приклади реалізації

Для налаштування розробленої апаратно-програмної системи сигнального перетворення та реалізації на ній інтегрованих сенсорів розроблено програмне забезпечення PSoC MS (PSoC Multi Sensor). Використання цього програмного забезпечення дозволяє проводити динамічне реконфігурування системи, специфікацію її компонентів, встановлювати режими вимірювання та графічно відображати отримані результати.

Апробація цієї системи була здійснена в процесі реалізації різноманітних інтегрованих сенсорів, зокрема, сенсорів термічного аналізу на принципі диференційної скануючої калориметрії (Differential Scanning Calorimetry), сенсорах просторового положення на принципі магнітного трекінгу (Magnetic Tracking), сенсорах оптоелектроніки (на оптопарах LED/OLED - фотодіод) та імпедансної спектроскопії (Impedance Spectroscopy).

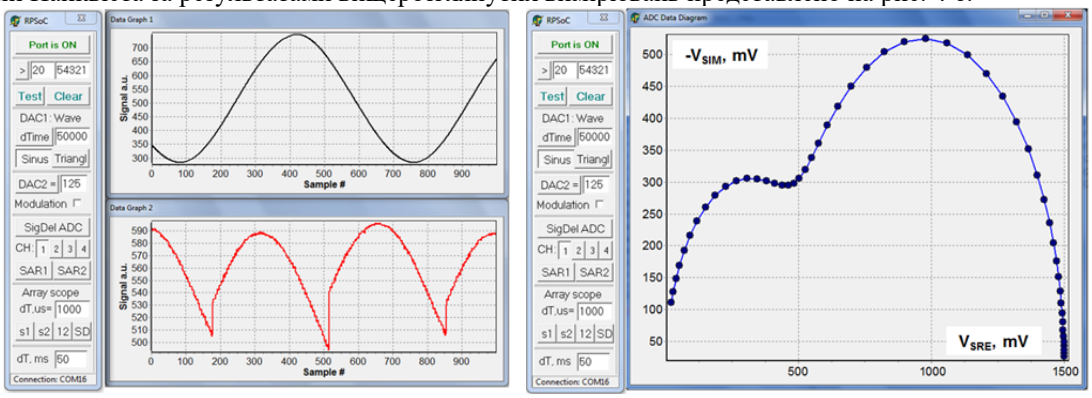
Приклади використання представленої в роботі системи сигнального перетворення в калориметричних сенсорах представлено на рис. 19, а в сенсорах магнітного трекінгу – на рис. 20.



а) б)

Рис. 3. Залежності вихідних сигналів: а) – калориметричного сенсора; б) – магнітного трекінгу

На рис. 4 а представлено результати вимірювання форм сигналу активації (зверху) та відгуку (знизу), що використовуються для розрахунку дійсної та уявної складових імпедансу. Приклад сформованої діаграми Найквіста за результатами вищерозглянутих вимірювань представлено на рис. 4 б.



а) б)

Рис. 4. Результати дослідження імпедансних характеристик: а) – сигнали активації та відгуку; б) – діаграма Найквіста

Висновки

Розроблений сигнальний перетворення може бути використаний для побудови інтегрованих сенсорів з реалізацією технології синтезу даних з різними фізичними величинами – електричним струмом, електричною ємністю, теплом, світлом, магнітним полем.

Література

1. Antoon Bronselaer, Daan Van Britsom, Guy De Tré. Propagation of Data Fusion // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering Year: 2015 , Volume: 27 , Issue: 5 Pages: 1330 – 1342.

2. Jens Fisseler, Imre Fehér. Data fusion with probabilistic conditional logic // Logic Journal of the IGPL Year: 2010 , Volume: 18 , Issue: 4 Pages: 488 – 507.

3. Kaibo Liu, Shuai Huang. Integration of Data Fusion Methodology and Degradation Modeling Process to Improve Prognostics // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering Year: 2016 , Volume: 13 , Issue: 1 Pages: 344 – 354.

4. Furqan Alam, Rashid Mehmood, Iyad Katib, Nasser N. Albogami, Aiiad Albeshri. Data Fusion and IoT for Smart Ubiquitous Environments: A Survey // IEEE Access Year: 2017, Volume: 5 Pages: 9533 – 9554.

5. Jiandong Zhao, Yuan Gao, Yunchao Qu, Haodong Yin, Yiming Liu, Huijun Sun. Travel Time Prediction: Based on Gated Recurrent Unit Method and Data Fusion // IEEE Access Year: 2018 , Volume: 6 Pages: 70463 – 70472.

6. Tülay Adali, Yuri Levin-Schwartz ,Vince D. Calhoun. Multimodal Data Fusion Using Source Separation: Application to Medical Imaging // Proceedings of the IEEE Year: 2015 , Volume: 103 , Issue: 9 Pages: 1494 – 1506.

7. Siamac Fazli, Sven Dähne ,Wojciech Samek, Felix Bießmann, Klaus-Robert Müller. Learning From More Than One Data Source: Data Fusion Techniques for Sensorimotor Rhythm-Based Brain Computer Interfaces // Proceedings of the IEEE Year: 2015 , Volume: 103 , Issue: 6 Pages: 891 – 906.

8. Zuozhu Liu, Wenyu Zhang, Shaowei Lin, Tony Q.S. Quek. Heterogeneous Sensor Data Fusion By Deep Multimodal Encoding // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing Year: 2017 , Volume: 11 , Issue: 3 Pages: 479 – 491.

9. Shesheng Gao, Yongmin Zhong, Wei Li. Random Weighting Method for Multisensor Data Fusion // IEEE Sensors Journal Year: 2011 , Volume: 11 , Issue: 9 Pages: 1955 – 1961.

10. Manish Kumar, Devendra P. Garg, Randy A. Zachery. A Method for Judicious Fusion of Inconsistent Multiple Sensor Data // EEE Sensors Journal Year: 2007 , Volume: 7 , Issue: 5 Pages: 723 – 733.

11. Dorota A. Grejner-Brzezinska, Charles K. Toth, Terry Moore, John F. Raquet, Mikel M. Miller, Allison Kealy. Multisensor Navigation Systems: A Remedy for GNSS Vulnerabilities // Proceedings of the IEEE Year: 2016 , Volume: 104 , Issue: 6 Pages: 1339 – 1353.

12. Yan Wang,Shuang Cang, Hongnian Yu. A Data Fusion-Based Hybrid Sensory System for Older People's Daily Activity and Daily Routine Recognition // IEEE Sensors Journal Year: 2018 , Volume: 18 , Issue: 16 Pages: 6874 – 6888.

13. Pei-Hsuan Tsai, Ying-Jun Lin, Yi-Zong Ou, Edward T.-H. Chu, Jane W. S. Liu. A Framework for Fusion of Human Sensor and Physical Sensor Data // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems Year: 2014 , Volume: 44 , Issue: 9 Pages: 1248 – 1261.

14. C. Christopher Stemple, Hyuck-Jin Kwon, Jeong-Yeol Yoon. Rapid and Sensitive Detection of Malaria Antigen in Human Blood With Lab-on-Chip // IEEE Sensors Journal. – 2012. Vol. 12 , Issue: 9. – PP. 2735 – 2736.

15. Bassi, M. Bauer, M. Fiedler, Th. Kramp, R. van Kranenburg, S. Lange, S. Meissner. Enabling Things to Talk: Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model. – Springer. – 2013. – 325 P.

16. PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc.

References

1. Antoon Bronselaer, Daan Van Britsom, Guy De Tré. Propagation of Data Fusion // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering Year: 2015 , Volume: 27 , Issue: 5 Pages: 1330 – 1342.

2. Jens Fisseler, Imre Fehér. Data fusion with probabilistic conditional logic // Logic Journal of the IGPL Year: 2010 , Volume: 18 , Issue: 4 Pages: 488 – 507.

3. Kaibo Liu, Shuai Huang. Integration of Data Fusion Methodology and Degradation Modeling Process to Improve Prognostics // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering Year: 2016 , Volume: 13 , Issue: 1 Pages: 344 – 354.

4. Furqan Alam, Rashid Mehmood, Iyad Katib, Nasser N. Albogami, Aiiad Albeshri. Data Fusion and IoT for Smart Ubiquitous Environments: A Survey // IEEE Access Year: 2017, Volume: 5 Pages: 9533 – 9554.

5. Jiandong Zhao, Yuan Gao, Yunchao Qu, Haodong Yin, Yiming Liu, Huijun Sun. Travel Time Prediction: Based on Gated Recurrent Unit Method and Data Fusion // IEEE Access Year: 2018 , Volume: 6 Pages: 70463 – 70472.

6Tülay Adali, Yuri Levin-Schwartz ,Vince D. Calhoun. Multimodal Data Fusion Using Source Separation: Application to Medical Imaging // Proceedings of the IEEE Year: 2015 , Volume: 103 , Issue: 9 Pages: 1494 – 1506.

7. Siamac Fazli, Sven Dähne ,Wojciech Samek, Felix Bießmann, Klaus-Robert Müller. Learning From More Than One Data Source: Data Fusion Techniques for Sensorimotor Rhythm-Based Brain Computer Interfaces // Proceedings of the IEEE Year: 2015 , Volume: 103 , Issue: 6 Pages: 891 – 906.

8. Zuozhu Liu, Wenyu Zhang, Shaowei Lin, Tony Q.S. Quek. Heterogeneous Sensor Data Fusion By Deep Multimodal Encoding // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing Year: 2017 , Volume: 11 , Issue: 3 Pages: 479 – 491.

9. Shesheng Gao, Yongmin Zhong, Wei Li. Random Weighting Method for Multisensor Data Fusion // IEEE Sensors Journal Year: 2011 , Volume: 11 , Issue: 9 Pages: 1955 – 1961.

10. Manish Kumar, Devendra P. Garg, Randy A. Zachery. A Method for Judicious Fusion of Inconsistent Multiple Sensor Data // EEE Sensors Journal Year: 2007 , Volume: 7 , Issue: 5 Pages: 723 – 733.

11. Dorota A. Grejner-Brzezinska, Charles K. Toth, Terry Moore, John F. Raquet, Mikel M. Miller, Allison Kealy. Multisensor Navigation Systems: A Remedy for GNSS Vulnerabilities // Proceedings of the IEEE Year: 2016 , Volume: 104 , Issue: 6 Pages: 1339 – 1353.

12. Yan Wang,Shuang Cang, Hongnian Yu. A Data Fusion-Based Hybrid Sensory System for Older People's Daily Activity and Daily Routine Recognition // IEEE Sensors Journal Year: 2018 , Volume: 18 , Issue: 16 Pages: 6874 – 6888.

13. Pei-Hsuan Tsai, Ying-Jun Lin, Yi-Zong Ou, Edward T.-H. Chu, Jane W. S. Liu. A Framework for Fusion of Human Sensor and Physical Sensor Data // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems Year: 2014 , Volume: 44 , Issue: 9 Pages: 1248 – 1261.

14. C. Christopher Stemple, Hyuck-Jin Kwon, Jeong-Yeol Yoon. Rapid and Sensitive Detection of Malaria Antigen in Human Blood With Lab-on-Chip // IEEE Sensors Journal. – 2012. Vol. 12 , Issue: 9. – PP. 2735 – 2736.

15. Bassi, M. Bauer, M. Fiedler, Th. Kramp, R. van Kranenburg, S. Lange, S. Meissner. Enabling Things to Talk: Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model. – Springer. – 2013. – 325 P.

16. PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc.

Надійшла / Paper received : 08.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНОЇ, ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-161-167
UDC 677.11: 338.4:006.015.8

A. TIKHOSOV, Y. BEREZOVSKIY, T. KUZMINA, S. PUTINTSEVA
Kherson National Technical University, Department of Commodity Studies, Standardization and Certification, Kherson, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE DECORTICATION STEMS OF RETTED STRAW OF BAST CROPS DEPENDING ON THEIR MOISTURE

The paper contains the results of theoretical and experimental studies aimed at determining the effect of moisture content of retted straw stems on the quality of their mechanical processing in the process of decortication and subsequent scutching for clearing a fibrous part of the stems from wood – shives. To achieve the main goal, mathematical planning of the experiment on identifying the optimal values of moisture content of the stems of bast crops for their mechanical processing has been conducted, which resulted in a high degree of fiber clearing from shives ranging between 1.83 to 4.53 % with full strength retention of the fiber.

Keywords: moisture content, bast crops, stems, oil flax, technical hemp, raw fiber, decortication, scutching, strength.

А.С. ТІХОСОВ, Ю.В. БЕРЕЗОВСЬКИЙ, Т.О. КУЗЬМІНА, С.В. ПУТІНЦЕВА
Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДЕКОРТИКАЦІЇ СТЕБЕЛ ТРЕСТИ ЛУБ'ЯНИХ КУЛЬТУР ЗАЛЕЖНО ВІД ЇХ ВОЛОГОСТІ

Представлена робота містить результати теоретичних та експериментальних досліджень спрямованих на оптимізацію механічних процесів переробки луб'яних культур в залежності від вологості стебел, які подаються на декортикацію і подальше тіпання для очищення волокнистої частини стебел від деревини – костриці. Вказується на те, що модернізація лляного виробництва повинна проходити через застосування сучасних технологічних розробок і обладнання обробки лляної сировини. Для досягнення основної мети роботи проведено математичне планування експерименту з виявлення оптимальних значень вологості стебел луб'яних культур для їх механічного оброблення, за яких одержується висока ступінь очищення волокна від костри від 1,83-4,53 % при повному збереженні міцності волокна.

Вологість стебел луб'яних культур є найважливішою технологічною характеристикою, 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 костри у волокні і міцність його напряму залежить від первинної вологості стебел, які подаються на переробку. Тому в даній роботі поставлено завдання визначити оптимальні значення вологості тресті луб'яних культур для одержання високої якості оброблення стебел на декортикаторах в процесі м'яття і тіпання на тіпальних машинах для різних типів та сортів луб'яних культур і льону-довгунця сортів «Гладіатор», «Есмань», льону олійного сортів «Південна ніч», «Дебют» та технічних конопель сорту «ЮСО-31».

У результаті аналізу впливу вологості тресті луб'яних культур льону олійного, технічних конопель на якість одержаного волокна встановлена чітка залежність фізико-механічних характеристик волокна: відсоткового виходу волокна сирцю, розривного навантаження волокна та вмісту костри від вологості стебел, які подаються на механічну обробку. Чим менша вологість стебел перед механічною обробкою, тим вища якість одержуваного волокна і ступінь його очищення від костри.

Ключові слова: вміст вологи, луб'яні культури, стебла, льон олійний, технічні коноплі, сирець, декортикація, тіпання, міцність.

Introduction

The moisture content of the bast crop stems is the most important technological characteristic, as their storage, a biological process of laying out in the field during the transformation of straw stems into the retted straw and the mechanical process of fiber separation from the woody part of the stems depend on moisture content in the stems. Thus, the main characteristics of the quality of bast fibers after mechanical processing of the stems such as, the content of shives in the fiber and its strength directly depend on the primary moisture content of the stems that are sent to be processed. Therefore, it is important to establish the optimal moisture values of the bast crop stems for obtaining high-quality fiber with the lowest content of shives and high strength after mechanical processing of the stems in decorticators during breaking and scutching on scutching machines.

In previous scientific papers (Tikhosov A.S., et. al 2019) standardized moisture parameters by which the stems of bast crops of flax, oil flax, technical hemp should be processed using the technologies of storage, a biological process of obtaining retted straw, and mechanical processing of the stems for obtaining the fiber have been identified. But the normalized values of moisture content of straw, retted straw, and bast crops fiber, which are given in the relevant standards DSTU 4149: 2003, DSTU 8422: 2015, and TUU 01.1-05480298-002.2018 do not correspond to the optimal values of a moisture content depending on the type and variety of bast crops and require systematic control of moisture content at each stage of technological processes of bast stems processing. At present, modern moisture and temperature sensors (Arduino-ua.com) which can be successfully used in automated control of moisture content of bast-fiber stems based on the RaspberryPl B + microcomputer have been developed (Petin V.A, 2015). The application of the moisture control system based on the RaspberryPl B + microcomputer in the

technological process of obtaining retted straw by laying out fiber flax stems in the field is shown in the work of A.S. Tikhosov. (Tikhosov A.S., et. al. 2017). But the influence of moisture content on the quality of mechanical processing of bast crop stems from the process of decortication and scutching is not revealed in this paper.

Therefore, the task of this paper is to establish the effect of moisture content of bast-fiber stems on the quality of processing the stems in decorticators in the process of breaking and scutching on scutching machines for different types and varieties of bast crops such as fiber flax "Gladiator" and "Esman", oil flax "Pivdennanich", "Debut" and technical hemp "YUSO-31" intending to determine the optimal values of moisture content for obtaining a high quality of mechanical processing of the stems.

Materials and methods

For conducting systematic experimental studies, the retted straw biologically obtained in the field in the process of laying out the straw stems of different varieties of oil flax "Pivdennanich", "Debut", fiber flax "Gladiator" and "Esman", and technical hemp "YUSO-31" was used. The maturation process of the retted straw was monitored using the installed sensors SU-21NTI21 in the field, moisture content and temperature were fed to the server of the microcomputer RASPBERRY Pl B + (Tikhosov A.S. et.al., 2017). As a result of automated control of the biological process, the retted straw with standardized indices of separation of 3.6–4.0 units was obtained. Hereinafter, the retted straw stems were decorted in the breaking machine. The initial moisture content of the retted straw, which was processed in the breaking machine, was 8%. Then, after artificial moistening, the moisture content of the stems varied from 8.0 to 22%. After decortication of the retted straw stems the fiber - raw fiber was obtained. The quality of the fiber was evaluated by physical and mechanical parameters of the raw fiber, such as fiber yield, breaking load (strength), and the content of shives, by DSTU 5015: 2008 "Flax fiber, short". Technical conditions, GOST 9993-2014 "Hemp short". Specifications U 01.1-05480298-002: 2018 "Oil flax fiber", GOST 23087-78 "Short hemp for export". Technical conditions, DSTU 8422: 2015 "Hemp retted straw". Technical conditions according to standard methods.

The fiber yield was determined by weighing the retted straw stems (Ст) before mechanical processing in the decorticator or scutching machines, and the fiber (Св) obtained after mechanical processing:

$$B = \frac{C_в}{C_m} 100\% \quad (1)$$

Breaking load (strength) of raw fiber after decortication and fiber after complete clearing in the process of scutching was determined by breaking the fiber samples on the tensile-testing machine ДКВ-60.

The content of shives was determined by weighing the shive (Ск), which was isolated from the fiber and the resulting amount of shives was attributed to the primary weight of the raw fiber (Св) after decortication or fiber weight (Св) after additional cleaning on scutching machines:

$$K = \frac{C_к}{C_m} 100\% \quad (2)$$

The results of the effect of moisture of the bast crop stems on the quality of retted straw processing after decortication are shown in table 1. (Beresovsky Yu.V., et.al., 2016)

Table 1

The effect of moisture content of the retted straw on the quality of obtained raw fiber after decortication of stems on a breaking machine

Types of bast-fiber retted straw	Moisture content of retted straw, %	Yield of raw fiber after decortication, %	Breaking load, daN	Content of shives, %
Oil flax "Pivdennanich"	8,0	26,15	17,87	36,90
	15,0	21,34	16,53	39,26
	22,0	17,69	13,93	41,04
Oil flax "Debut"	8,0	26,21	18,46	36,87
	15,0	21,42	17,39	39,25
	22,0	17,74	14,31	41,01
Fiber flax "Gladiator"	8,0	27,87	23,28	36,03
	15,0	23,85	22,54	38,02
	22,0	19,63	19,72	40,04
Fiber flax "Esman"	8,0	27,96	24,35	35,96
	15,0	23,91	23,61	37,94
	22,0	19,78	19,97	39,98
Industrial hemp "YUSO-31"	8,0	26,92	27,31	36,50
	15,0	22,47	26,79	38,73
	22,0	18,59	23,84	40,62

After breaking the retted straw stems of the studied varieties of bast crops listed in table 1, and their decortication, raw fiber, and shives were obtained. Subsequently, raw fiber was processed on a scutching machine of the SMT machine for additional cleaning of it from shives. The results of the influence of moisture content on the yield of fiber and shives after the process of scutching are shown in table 2.

Table 2

The effect of moisture content of decorticated raw material on the efficiency of mechanical processing of fiber in the process of scutching

Types of bast fibre raw material	Moisture content of retted straw, %	Fibre yield, %	Content of shives, %
Oil Flax "Pivdennanich"	8,0	16,45	2,19
	14,0	16,57	2,27
	18,0	16,74	3,03
	21,0	16,86	3,73
Oil Flax "Debut"	8,0	20,01	2,16
	14,1	20,14	2,24
	18,0	20,23	3,01
	21,0	20,34	3,69
Fiber Flax "Gladiator"	8,0	28,18	1,83
	14,0	28,30	1,96
	18,0	28,41	3,48
	21,0	28,52	3,85
Fiber Flax "Esman"	8,0	29,21	1,86
	14,1	29,33	1,99
	18,0	29,45	3,53
	21,0	29,57	3,91
Industrial Hemp "YUSO-31"	8,0	27,98	2,05
	14,0	28,11	2,24
	18,0	28,35	3,75
	21,0	28,48	4,28

Analysis and generalization of results

According to Table 1, diagrams of the dependence of the yield of raw fiber (Fig. 1), breaking load (Fig. 2), and the content of shives (Fig. 3) on a moisture content of the stems of retted straw after decortication have been constructed.

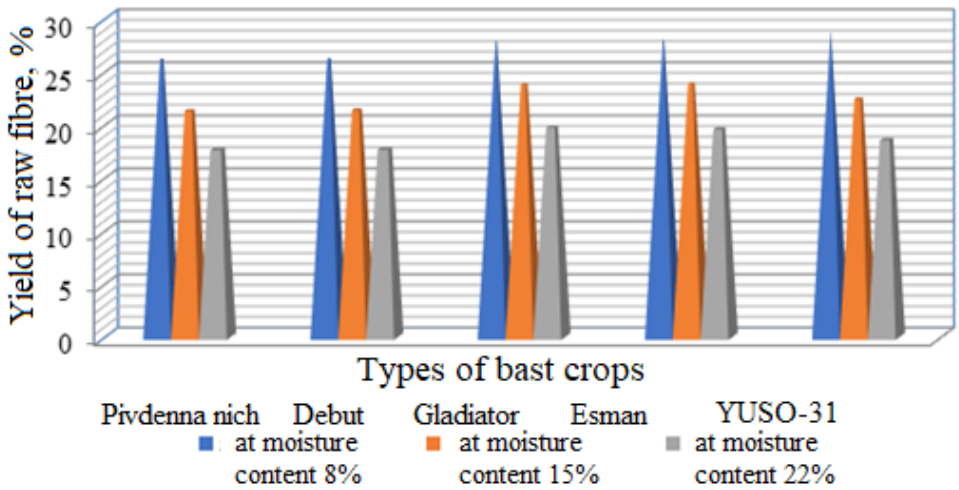


Fig. 1. Dependence of the yield of raw fiber on moisture content of the retted straw stems after decortication

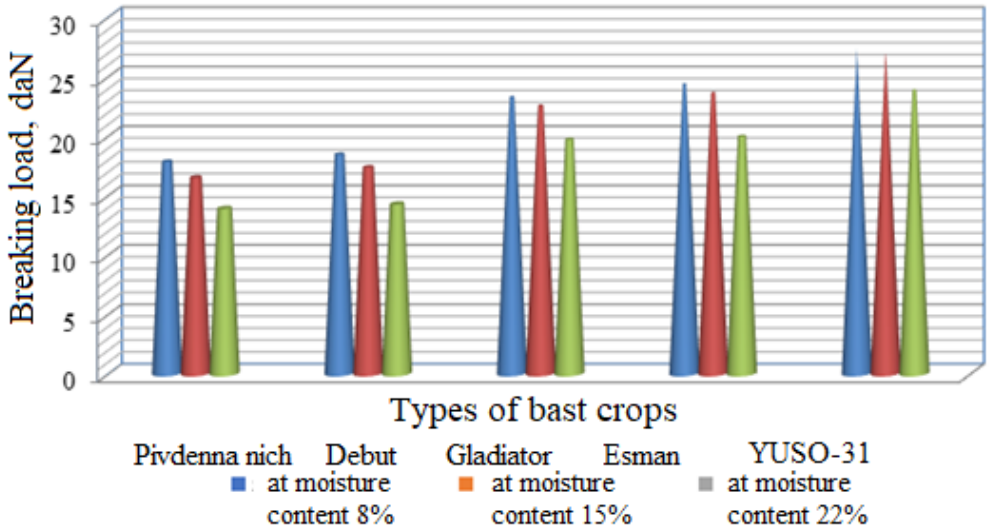


Fig. 2. Dependence of the breaking load of raw fiber on moisture conten to the retted straw stems after decortications

From the above diagrams it is clear that the increased yield of raw fiber is obtained at low moisture of retted straw stems for all types of bast crops of oil flax, fiber flax and technical hemp and the studied varieties – Pivdennanich, Debut, Gladiator, Esman, YUSO-31. The analysis of Fig.1 makes it possible to conclude that reducing the moisture content of the retted straw stems from 22 % to 8 % can increase the yield of the raw fiber from 17.69 to 27.87 % after decortication, while the content of shive in the fiber reduces from 41.04 to 35,96 % (Fig. 3), and the breaking load of the fiber in processing stems with low moisture content of 8 % has increased indices (Fig. 2).

After processing of the raw fiber on a scutching machine, the content of retted straw in the fiber (Table 1) is significantly reduced from 4.28 % to 1.83 %. The lowest values of the retted straw are contained in the fiber obtained from the raw fiber with the lowest values of moisture content (Table 2).

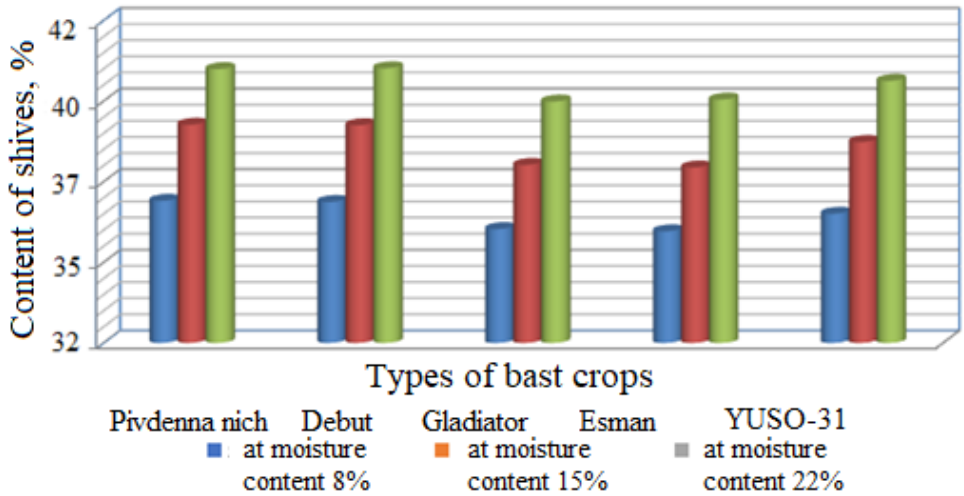


Fig. 3. Dependence of the content of shives in fiber on moisture content of the retted straw stems after decortications

The fiber yield after additional cleaning on the scutching machines doesn't depend on the moisture of the raw fiber (Table 2), and the content of shives in the acceptable fiber with reduced moisture content in the raw fiber is significantly reduced (Table 2). So, for a type of flax oil "Pivdennanich" at the decrease in the moisture content of the raw fiber from 21-8 %, the content of shives decreases from 3,73 to 2,19 %, and for the fiber of technical hemp at the same decrease of moisture content of the raw fiber, the content of shives decreases from 4.28 to 2.05 %, i.e. almost twice, and the fiber yield remains at the same level of 27.98 - 28.48 %.

Resultsand discussion

To determine the optimal values of moisture content of bast crop retted straw, which must be used for high-quality mechanical processing of the stems, a complete factorial experiment on determining the mathematical dependence of raw fiber yield, breaking load, and the shive content in the fiber after decortication using the innovative technologies on the moisture content of the bast crop stems, which are fed to mechanical processing using the innovative technologies has been conducted in this paper. (Beresovsky Yu.V., et.al., 2020). The stems of technical hemp of YUSO-31 type were taken as an example for a complete factorial experiment. Levels and

intervals of the variation of factors of mechanical processing of technical hemp stem in the process of decortication are given in table 3. (Putintseva S.V., et.al., 2017)

Table 3

Levels and intervals of the variation of the factors of mechanical processing of the retted straw stems of technical hemp of YUSO-31 type in the decorticator

Factors	Variation Levels					Interval of variation
	-1,68	-1	0	+1	+1,68	
Unit pressure on 1 linear cm of the stem layer in a pair of breaker rollers, (x_1)	8,12	8,8	9,8	10,8	11,48	1,0
Moisture content of raw materials, (x_2)	7,96	10	13	16	18,04	3,0
Separability of retted straw stems, (x_3)	2,64	4,0	6,0	8,0	9,36	2,0

The initial parameters of this experiment corresponded to the physical and mechanical characteristics of the obtained fiber after mechanical processing: fiber yield (y_1), breaking load (y_2), and the content of shives(y_3). The independent input parameters such as the unit pressure in a pair of breaker rollers of the decorticator (x_1), moisture content of the stems (x_2) and separability (x_3) are shown in Table 3.

The results of a complete factorial experiment are shown on the graph of the dependence of the fiber yield $y_1$on the unit pressure of the rollers in the decorticator (x_1), moisture content of the retted straw stems(x_2) and the degree of retted straw aging (x_3), and described by mathematical dependence:

$$y_1 = 22.76 + 2.37x_1 + 0.72x_3 - 1.02x_1^2 - 0.79x_2^2 - 0.57x_3^2 \quad (3)$$

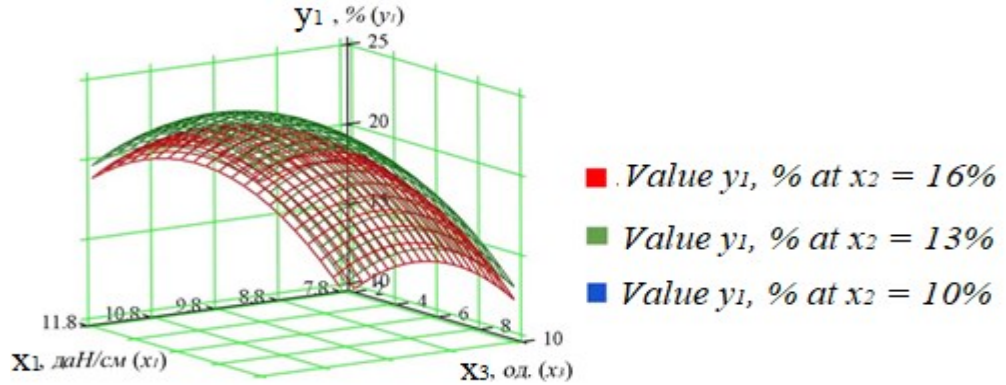


Fig. 4. Dependence of the yield of raw fiber y_1 on the unit pressure of the rollers in the decorticator (x_1), moisture content of the raw material (x_2) and the degree of retted straw aging (x_3)

The obtained mathematical dependence confirms the hypothesis that reducing the moisture content of retted straw stems improves the quality of mechanical processing and increases the fiber yield. The optimal value of moisture content is the values that are in the range of 8-11 %. The mathematical dependence of the breaking load (y_2) on the unit pressure of the rollers in the decorticator (x_1), a moisture content of retted straw stems (x_2),and the degree of retted straw aging (x_3) have also been obtained:

$$y_2 = 18,02 - 0,60x_1 - 0,27x_2 - 0,23x_3 - 0,62x_1^2 - 0,34x_2^2 - 0,18x_3^2 \quad (4)$$

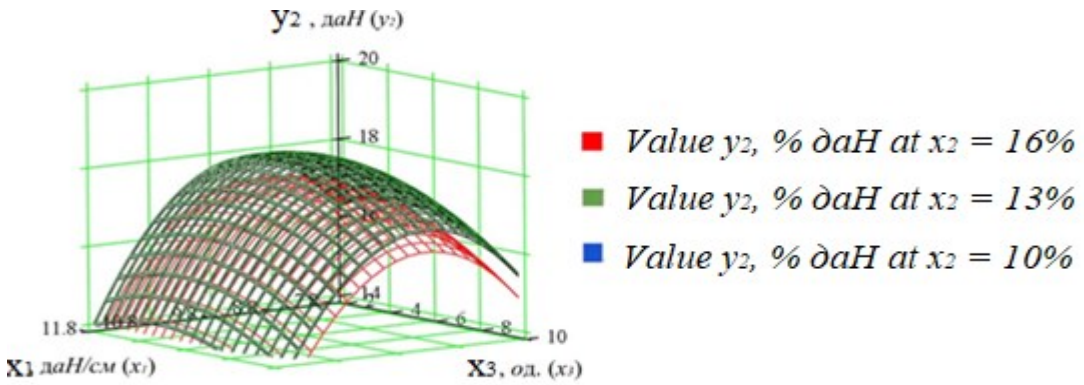


Fig. 5. Dependence of the breaking load (y_2) on the unit pressure of the rollers in the decorticator (x_1), moisture content of the raw material (x_2) and the degree of retted straw aging (x_3)

From the obtained dependence (4) and the graph (Fig. 5), it is clear that the breaking load of the fiber in the process of decortication remains unchanged as moisture content is reduced, which makes it possible to confirm that the fiber strength is preserved with increasing the fiber yield and reducing the moisture content of the stems fed to mechanical processing.

The third mathematical dependence of the content of shives in the fiber after mechanical processing of the retted straw stems (y_2) on the unit pressure of the rollers in the decorticator (x_1), moisture content of the retted straw stems (x_1), and the degree of retted straw aging (x_1), is described by equation (5):

$$y_3 = 71,77 - 0,81x_1 - 0,25x_3 + 0,33x_1^2 + 0,28x_2^2 + 0,20x_3^2 \quad (5)$$

and is presented on the graph (Fig. 6).

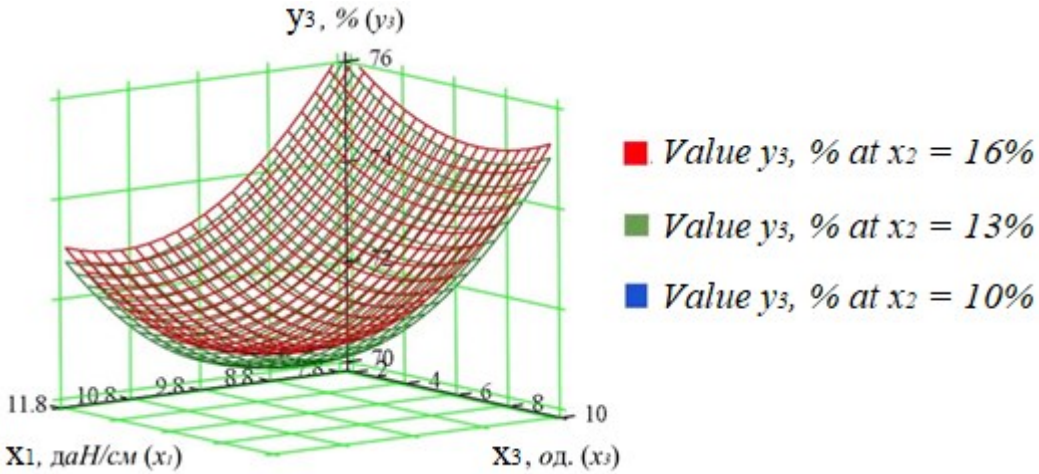


Fig. 6. Dependence of the shive content, K,% (y_3) on the unit pressure of the rollers in the decorticator (x_1), moisture content of the raw material (x_2) and the degree of retted straw aging (x_3)

From the obtained data of equation (5) and graphical dependence (Fig. 6), it is clear that the increased moisture content of stems of hemp retted straws for their mechanical processing has a negative effect on the process of shive extraction from the fiber. With an increased moisture content of the stems the content of shives in the fiber increases, so to clean the fiber from shives it is necessary to maintain the lowest values of moisture of the retted straw stems, which is subject to mechanical processing at 8-10%. (Kuzmina T.O., et.al., 2020).

On the basis of the obtained regression dependences, 3-5 on the example of retted straw stems of technical hemp of YUSO-31 type a control program for the mechanical processing of retted straw stems of bast crops with constant control of moisture content of stems will be developed in the future, which will be fed to decortication at certain values of the unit pressure of a stem layer in a pair of breaker rollers and separability of retted straw.

Summary

As a result of the analysis of the influence of moisture content of bast crops retted straws of oil flax "Pivdennanich" and "Debut", fiber flax “Gladiator” and “Esman”, technical hemp “YUSO-31” on the quality of the obtained fiber, a clear dependence of physical and mechanical characteristics of the fiber such as, percentage of the yield of raw fiber, breaking load of the fiber and the content of shives on the moisture content of the stems that are fed to mechanical processing: the lower the moisture content of the stems before mechanical processing, the higher the quality of the fiber and the degree of its cleaning from shives. It is established that the increase in moisture content in the stems of bast crops straw above 10% leads to a loss of quality of the obtained fiber by 11% and its consumer value. (Tikhosov A.S., et.al., 2020).

References

1. Tihosov A.S., Tsivilskiy F.N., Sherstjuk V.G. (2017). The Development of Humidity Control Basedon Microcomputer Raspberry Pl B+. Visnyk of Kherson National Technical University, Vol. 2(61). pp. 228-233.
2. Tikhosov A.S., Babich S.S., Knyazev A.V. (2019), The actuality of control of moisturein bast raw material according to the existing standards. Standartion, Sertification, Quality. pp. 4-8.
3. Tikhosov A.S., Mandra O.N., Klevtsov K.N., (2020) Influence of Humidity on the Quality of Products from bast fibers. Quality and certification of Products: articles from ainter national scientific and practical conference. Varna. pp 305-310.
4. Tikhosov A.S., Tsivilskiy F.N. (2018). Humidity and Temperature. Volohist i temperatura (Prohramnyi produkt), Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir № 78846 (in Ukraine).
5. Berezovsky Yu.V. (2017). Technical solution for processing off lax raw materials. Science and innovation. Vol. 13, № 3, pp. 25-37.

6. Berezovsky Yu.V. (2016). Application of new technical decision in the industrial flax production. Science and innovation, Vol. 12, № 4, pp. 53-70.

7. Berezovsky Yu., Kuzmina T., Lialina N., Yedynovych M., Lobov O. (2020). Technical and technological solutions for producing fiber from bast crops. INMATEH. Vol. 60, №. 1, pp. 137-146.

8. Putintseva S.V., Boyko G.A. (2017). Osoblyvosti vplyvu zbyrannia tekhnichnykh konopel na kintsevu syrovynu, Agronomy Journal, Issue 6(2), November-December. Vol. 109. pp. 1718-1725 (in Ukraine).

9. Berezovsky Yu.V. (2018). Optymizatsiia protsesu zberihannia llianoi syrovyny. Bean Bassin: LAPLAMBERT Academic Publishing, member of SIA Omni Sciptum Publishing, p 148 (in Ukraine).

10. HTU21 temperature and humidity sensor [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://arduino-ua.com/prod/222-datchik-vlajnosti-i-temperatyri.

11. Petin V.A. (2015). Microcomputers Raspberry Pl B+. St. Petersburg, 240 p.

Paper received : 19.12.2020 p. Printed :04.01.2021 p.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-168-170
УДК 677.074.35.017:658.512.2

Т.В. ЄЛІНА, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ ВИРОБІВ ТРУБЧАСТОЇ ФОРМИ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРИКОТАЖУ

Трикотаж переплетення ластик різних рапортів характеризується підвищеними показниками розтяжності, що забезпечує можливість виготовлення виробів прилеглої силуетної форми без використання еластомерних ниток. У процесі розтягу трикотажу ластичних переплетень вздовж петельного ряду відбувається зміна просторової конфігурації нитки в структурі переплетення за рахунок наступних процесів: зміна взаємного положення остовів суміжних петель одного шару, зменшення кривизни петельних та голкових дуг, зменшення взаємного заходу остовів, що належать різним шарам трикотажу, а на більш пізніх стадіях розтягу – перетягування нитки з остовів у протяжки. Якщо у процесі експлуатації виробу трикотаж розтягується настільки, що починається перерозподіл нитки між окремими елементами його структури, повернення у початковий стан ускладнюється зростанням частки залишкової деформації. Це призводить до швидкого псування зовнішнього вигляду трикотажного виробу та спричиняє недостатньо комфортне облягання тіла при його експлуатації. Тому при проєктуванні виробів трубчастої форми, що вдягаються на ділянку тіла з різними значеннями обхвата, розподіленими певним чином по довжині, необхідно забезпечити можливість автоматизованої оцінки рівня комфортності у процесі їх експлуатації.

У ході дослідження прийнято припущення про можливість геометричної оцінки комфортного деформування трикотажу. Розроблено алгоритм проєктування трикотажного виробу трубчастої форми, що виготовляється переплетенням ластик. На базі запропонованого алгоритму створено комп'ютерну програму LastikTube, написану мовою програмування AutoLisp для роботи у середовищі AutoCAD. У якості вихідних даних для розрахунку програма використовує розмірні ознаки ділянки тіла, рапорт ластику, вид сировини, бажаний рівень деформації розтягу на ділянці з мінімальним обхватом. Результатом роботи програми є побудова тривимірної макромоделі виробу а також формування текстового файлу, що містить вихідні та розрахункові дані. Програма звертається до двох баз даних, які у ході подальших досліджень будуть розширені. Це база даних геометричних характеристик трикотажу ластичних переплетень та база даних круглов'язального обладнання.

Ключові слова: трикотаж, ластик, трубчасті вироби, автоматизоване проєктування, тривимірне геометричне моделювання

T.V. YELINA, L.YE. HALAVSKA
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

DESIGN OF TUBULAR SHAPE PRODUCTS TAKING INTO ACCOUNT THE DEFORMATION PROPERTIES OF KNITWEAR

Rib knitted structure has an intrinsic elasticity that makes it possible to produce knitwear of an adjoining silhouette avoiding the use of elastomeric threads. In the process of stretching the rib knits in the coursewise direction its structure is undergoing some changes in configuration of the thread and structure elements, such as: changing the relative position of the adjacent loops of one layer, straightening loop heads and loop feet, reducing the mutual covering of loops belonging to different layers of knitwear, and in the later stages of the stretching process, pulling the thread from loop legs to loop feet. If during the end use of the product it is being stretched so much that the redistribution of the thread between different parts of the knitted structure elements begins, the return to the original state can be difficult due to increasing part of unrecovered elongation which causes rapid deterioration of the appearance of the product and uncomfortable pressure when using it. Therefore, when designing tubular rib knitted products worn on the body with different values of the girth measured along the length of the product, it is necessary to provide the possibility of a computer aided assessment of the comfort of the end use of the future product.

During the study, an assumption about the possibility of geometric evaluation of comfortable deformation level of knitwear was made. An algorithm for designing a tubular knitwear item with rib knit structure has been developed. Based on the proposed algorithm, a computer program LastikTube was develops, by means of AutoLisp programming language for work in AutoCAD environment. As input data for calculation the program uses three girths of a body part, the rib structure pattern information, yarn characteristics, desirable stretching in the part with the minimum perimeter. The result of the program calculation is a 3D macro-model of the product and a text file containing the source and calculation data. The program refers to two databases that will be expanded in the course of further research. This is a database of geometric characteristics of rib stitches and a database of circular knitting equipment.

Keywords: knitwear, rib stitches, tubular knitwear, CAD, 3D geometric modeling

Вступ

Пружні властивості трикотажного одягу закладені у саму структуру матеріалу, адже складна просторова конфігурація нитки, пров'язаної у трикотаж, легко змінюється під дією розтягуючих зусиль та відновлюється після їх усунення. Так, наприклад, палички остовів петель, а також платинні та голкові дуги, що в умовно-рівноважному стані характеризуються певною кривизною, під дією прикладеного розтягуючого зусилля розпрямлюються; петельні стовпчики, що належать різним шарам трикотажу, змінюють взаємноє положення; утворені при в'язанні ластиків великих рапортів закручені ділянки гладі розгортаються, а після його усунення повертаються у вихідне положення, що обумовлено проявом пружних властивостей та швидкооборотною складовою часткою деформації розтягу. При зростанні величини прикладеного розтягуючого зусилля на більш пізніх стадіях відбувається перерозподіл нитки між окремими елементами структури (нитка перетягується з остовів у протяжки). Конфігурація нитки в структурі

трикотажу залежить від обраного переплетення, а деформаційні властивості трикотажу в цілому – від виду переплетення, сировини, параметрів режимів в'язання та способів опорядження. Такі особливості трикотажу як текстильного матеріалу забезпечують можливість спрощення конструкції виробів прилеглої силуетної форми та окремих деталей виробу. Трикотажна оболонка приймає форму поверхні, на яку її вдягають, за рахунок того, що на ділянках зі збільшеним обхватом її периметр збільшується завдяки розтягу у межах швидкооборотних деформацій.

Постановка задачі

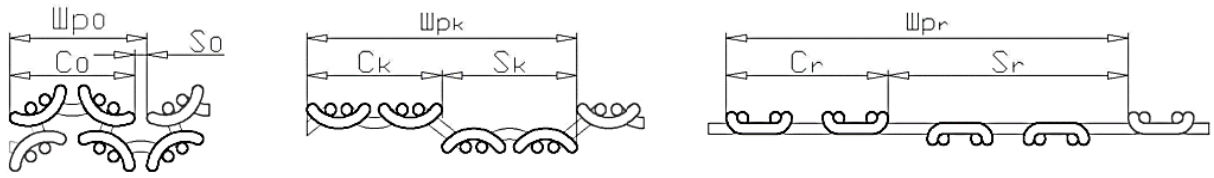
Сучасні технології дозволяють отримувати текстильні оболонки складної просторової форми різними способами. У виготовленні одягу традиційно найбільш розповсюдженим є метод розкроювання плоских тканих або трикотажних полотен за контуром лекал, які за формою та розмірами близькі до розгортки підодягової поверхні. На сьогодні, разом зі швидким зростанням можливостей комп'ютерних засобів, з'являються нові методи проєктування, що дозволяють не тільки побачити віртуальну модель у тривимірному просторі, але й досліджувати цю модель із застосуванням розрахунково-аналітичних комплексів. Поряд з цим все більшої популярності набувають безшовні технології в'язання, що передбачають отримання тривимірних одягових поверхонь без застосування розкрійних та швейних операцій. Різноманітні способи виготовлення безшовного одягу розглянуто у роботі Р.Ф. Каюмової [1]. Технології та обладнання для виготовлення безшовних трикотажних виробів проаналізовано у роботах [2,3]. У роботі [4] запропоновано способи виготовлення просторових текстильних оболонок методом ткацтва. Роботи [5 та 6] присвячено дослідженню тиску одягу на тіло людини та умов збереження відчуття комфорту у процесі експлуатації одягу. Вплив особливостей структури трикотажу деяких кулірних переплетень на їх властивості досліджено у роботі [7]. Роботи [9, 10, 12, 16, 15,17] направлені на вивчення властивостей трикотажу ластичних переплетень.

Ластик є одним з найбільш популярних подвійних кулірних переплетень, адже він забезпечує виробам, або окремим його ділянкам необхідну розтяжність та пружність, не створюючи при цьому зайвої компресії. Розтяжність трикотажу переплетення ластик таких рапортів як 1x1 та 2x2 складає близько 100%, а ластик з рапортом 3x3, 4x4, 5x5, 6x6 в залежності від виду сировини, може мати розтяжність 350% і навіть більше. У роботах, присвячених конструюванню трикотажних виробів, трикотаж розподіляють за групами розтяжності для визначення величини прибавок [0, стр. 50]. Оскільки майже всі ластики мають розтяжність більше 100%, їх відносять до третьої групи розтяжності, для якої рекомендовано стале значення від'ємної прибавки по ширині, яке дорівнює – 2 см. Однак, характер деформацій ластичних переплетень різних рапортів залежить від багатьох факторів. Тому у конструюванні виробів прилеглої силуетної форми з трикотажу переплетення ластик, необхідно враховувати величину деформації розтягу виробу у процесі його експлуатації, на підставі якої визначати необхідну та достатню для забезпечення пружних деформацій ширину деталі або трубки полотна. У ході дослідження прийнято рішення про необхідність розробки прикладного програмного забезпечення для проєктування виробів трубчастої форми ластичних переплетень. Трикотажним виробом трубчастої форми можна вважати трикотажну оболонку, яка у недеформованому стані має незмінну ширину вздовж твірної трубки, але при його вдяганні на поверхню він може приймати її форму та мати різний ступень розтягу на різних ділянках тіла. Надання виробу трубчастої форми може бути реалізовано безпосередньо у процесі в'язання (на круглих або плосков'язальних машинах) або шляхом зшивання протилежних кромок прямокутної деталі-напівфабрикату. У вигляді виробів трубчастої форми виготовляють зігріваючі наколінники, налокотники, гетри, майки-топи, мітенки.

Результати та обговорення

Зазвичай, розтяжність трикотажу кулірних переплетень у напрямку петельнх рядів завжди більша ніж у напрямку петельних стовпчиків. Найменшу розтяжність по ширині мають переплетення, що містять у своїй структурі ділянки ниток, не пров'язані в петлі, що розташовуються у напрямку петельних рядів. Це такі переплетення як одинарний жакард, утокові переплетення з горизонтальним прокладанням утокових ниток, футеровані та інші. Найбільші показники розтяжності мають ластичні переплетення, особливо переплетення ластик таких рапортів як 3+3, 4+4, 5+5, оскільки вони мають у своїй структурі ділянки гладі у різних шарах трикотажу, яка схильнаі до закручування. У вільному стані такі ластики мають меншу ширину, ніж гладь та ластик 1+1, вироблені при тій самій кількості працюючих голок. Завдяки цьому трикотаж таких переплетень має здатність до одноосних деформацій вздовж лінії петельного ряду на 150-350% відносно початкової ширини при мінімальних зусиллях розтягу. Деформаційні властивості ластичних переплетень дозволяють використовувати їх у виготовленні одягу побутового та спортивного призначення. Дослідження геометричної трансформації, яка відбувається у процесі розтягу трикотажу ластичних переплетень по ширині, результати якого наведено у роботах [16, 17, 18], показало, що зміна конфігурації та положення окремих елементів структури трикотажу у процесі розтягу по ширині відбувається нерівномірно. Для вивчення характеру перерозподілу нитки у структурі трикотажу у роботах [16 – 18] запропоновано використовувати такі умовні позначення як Шр – ширина рапорту, С – ширина проєкції опуклої частини рапорту на площину полотна та S – ширина проєкції видимої ділянки увігнутої частини рапорту на площину полотна. Якщо розбити процес розтягу трикотажу по ширині на n дискретних станів Tm, де m – номер стану, можна сказати, що $0 \leq m \leq r$, де 0 – індекс вільного стану (без розтягу (рис. 1 а), а r – індекс стану максимального розтягу (рис. 1 в), у який приходить зразок перед початком руйнування [17 та 18]. У процесі розтягу існує такий стан T_k, у якому ширина проєкції на площину полотна опуклої (C_k) частини рапорту

дорівнює ширині проєкції його увігнутої частини (S_k) так, як показано на рис. 1б. Для різних видів сировини та рапортів ластику стан T_k характеризується різним значенням відносного видовження по ширині Δl_k, %.



а б в

Рис. 1. Зміна положення та конфігурації окремих елементів структури трикотажу ластичних переплетень у процесі розтягу вздовж петельного ряду

При проєктуванні трикотажного виробу трубчастої форми необхідно враховувати відповідність його фізичних розмірів розмірним ознакам поверхні тіла людини, ступень розтягу на кожній ділянці з різною величиною обхвату та резерв розтяжності структури переплетення. На рис. 2 наведено блок-схему алгоритму проєктування трикотажного виробу трубчастої форми, виготовленого переплетенням ластик без зміни кількості працюючих голок та параметрів режиму вязання.

Набір вихідних даних для розрахунку включає величини обхвату окремих ділянок тіла, на яку буде одягнуто проєктований виріб у вигляді трубки ластичного переплетення на трьох рівнях О1, О2 та О3 та відстань по вертикалі між рівнями виміру обхватів L1 та L2 (рис. 3), вид сировини та рапорт ластичного переплетення. Перед початком розрахунку серед трьох значень обхватів обирається найвужча ділянка з обхватом O_{min} та найширша з обхватом O_{max}. Крім того, для розрахунку обирається бажаний інтервал варіювання попереднього розтягу на найвужчій ділянці виробу Δl_{min}, %. Для більшості виробів він може знаходитись у межах значення відносного видовження від 0 (без розтягу) до 20 %. На базі вихідних даних виконується розрахунок відносного видовження на ділянці з максимальним значенням обхвату Δl_{max}, %. Шляхом звернення у базу даних отримується значення Δl_k, для даного виду сировини та переплетення. У відповідності до прийнятого припущення вважаємо, що виконання умови (1) забезпечує збереження структури трикотажу під час багатоциклових одноосних деформацій у межах швидкооборотних деформацій, що забезпечують комфортні умови експлуатації виробу.

$$\Delta l_{max} \le 0{,}7\Delta l_k \qquad (1)$$

Виконання умови (1) для всіх заданих значень обхвату окремих ділянокк тіла свідчить про те, що експлуатація виробу відбуватиметься у межах пружних деформацій. Це дозволяє перейти до визначення технічних характеристик в’язальної машини, необхідних для виготовлення виробу із заданим рівнем деформації структури переплетення на окремих його ділянках. У випадку, коли умова (1) не виконується, необхідно внести корективи у вихідні дані шляхом зменшення величини деформації розтягу на найвужчій ділянці, вибору переплетення ластик більшого рапорту, або іншого виду сировини допоки не буде забезпечено комфортні умови експлуатації виробу внаслідок деформації структури трикотажу ластичного переплетення. Після визначення необхідної кількості голок у циліндрі машини відбувається перевірка наявності в'язального обладнання з заданими характеристиками на оснащенні підприємства. Якщо таке обладнання відсутнє, користувачу пропонується зробити вибір з декількох варіантів: а) виготовлення деталі на плосков’язальній машині; б) використання машини більшого діаметру для в’язання виробу з підкроєм та зтачуванням; в) вибір переплетення ластик іншого рапорту. Після успішного проходження перевірок, дані передаються у графічну програму для побудови тривимірної моделі з одночасним формуванням текстового файлу з вихідними даними та результатами розрахунку.

Для проєктування виробів трубчастої форми ластичних переплетень нами розроблено прикладне програмне забезпечення LastikTube, призначене для роботи у середовищі AutoCAD. Програма написана мовою програмування AutoLisp та виконує розрахунок ширини трубки полотна на підставі вихідних даних, а також в автоматизованому режимі забезпечує побудову тривимірної моделі ластичного виробу трубчастої форми, одягненого на рельєфну поверхню із заданими розмірними ознаками. На рис. 3 наведено схему зняття мірок для проєктування гетри. У діалоговому режимі користувач вводить довжину ділянок виробу L1 та L2, см., значення обхватів О1, О2, О3, см. Сировину та рапорт переплетення можна обрати з тих, що наявні у базі даних програми. У текстовому вікні необхідно ввести значення у відсотках бажаної деформації розтягу виробу у найвужчому місці (у наведеному прикладі це на рівні О1).

Програма визначає ступень розтягу ластичної трубки на різних ділянках виробу. Для ластичної трубки обраного рапорту на підставі даних про периметр одягненої поверхні на трьох рівнях програма, спираючись на базу даних властивостей трикотажу ластичних переплетень з різних видів сировини, розраховує величину деформації розтягу на всіх ділянках та перевіряє, чи вписується значення деформування у межі рекомендованих показників розтягу для комфортної експлуатації виробу. Проведення дослідження, результати якого представлені у роботах [16, 17], дозволило сформувати базу даних для опису характеру зміни поверхні трикотажу ластичних переплетень під дією одновісної деформації розтягу у

напрямку петельних рядів. Такі дані відображають особливості перерозподілу репрезентативного об'єму ниткової структури в оболонці внаслідок зменшення взаємного заходу ділянок окремих шарів трикотажу, зменшення закручуваності та перерозподілу нитки в елементах петельної структури, що відбувається на більш пізніх стадіях розтягу.

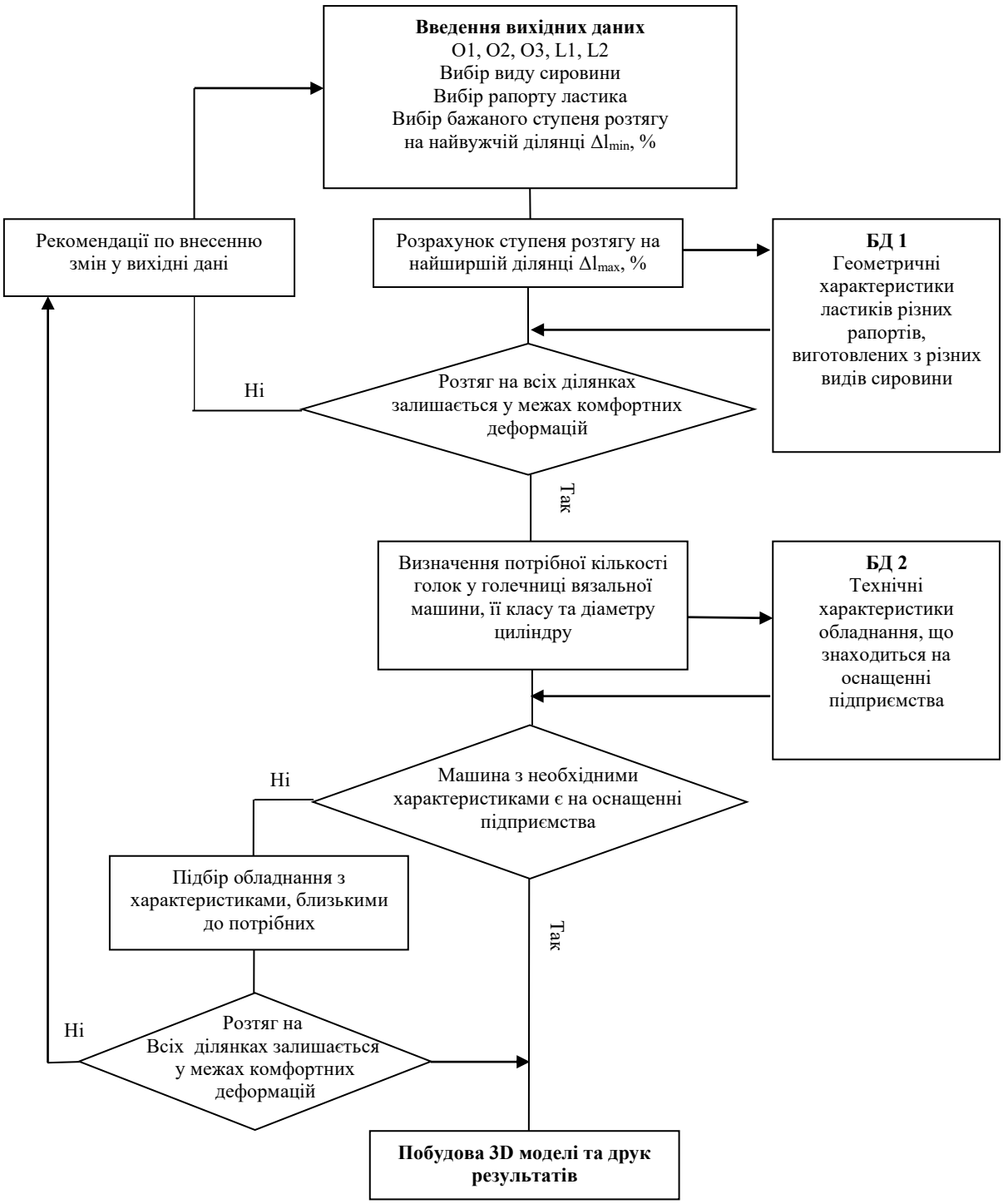


Рис. 2. Блок-схема алгоритму проєктування трикотажного виробу трубчастої форми, що виготовляється переплетенням ластик

Одним з таких популярних виробів трубчастої форми є спортивні гетри для гімнастики та танців. У якості вихідних даних для розрахунку необхідно вводити такі розмірні ознаки (рис. 3) як: довжина ділянок виробу L1 та L2, обхват ноги на рівні гомілки O1, обхват ноги на рівні литки O2, обхват ноги під коліном O3, а також рапорт переплетення та вид сировини. Оскільки гетри повинні добре триматися на нозі, навіть на найбільш вузьких ділянках, структура трикотажу повинна знаходитись у розтягнутомустані. Тому у якості вихідних даних пропонується обирати також показник бажаної деформації розтягу на найбільш вузькій ділянці, у нашому прикладі, на рівні виміру O1.

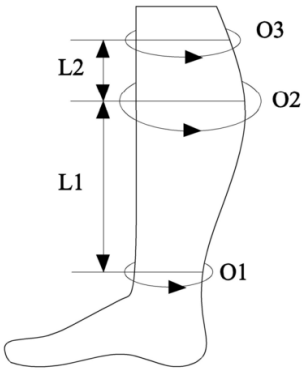


Рис. 3. Розмірні ознаки, що використовуються у якості вихідних даних для програми LastikTube

Даний показник користувач вводить у відсотках відносної зміни ширини трубки. У наведеному на рис. 4 прикладі цей показник обрано на рівні 10%. Результати роботи програми складаються з трьох частин. Це текстова частина, графічне представлення розподілу репрезентативного об'єму ниткової структури по поверхні трубки, вдягненої на ногу із заданими розмірними ознаками, та тривимірна макромодель виробу, що відображає форму текстильної оболонки без деталізації на рівні ниток. На рис. 5 наведено модель жіночого трикотажного виробу, побудована за двома варіантами розрахунку з підбором фотозображень відповідних зразків з бази даних програми.

Вихідні та Розрахункові дані:
Сировина – бамбукова пряжа 29х2 текс,
Переплетення ластик 2х2:
Довжина виробу - 350мм.
Обхват ноги на рівні 1 - 29см
Обхват ноги на рівні 2 - 43см
Обхват ноги на рівні 3 - 40см
Розтяг трикотажу на рівні гомілки - 10%
Максимальний розтяг трикотажу - 63.1034%
Кількість рапортів - 52
Ширина опуклої частини рапорту на рівні 1 (С1) - 4.5мм
Ширина рапорту на рівні 1 (Шр1)- 5.5мм
Ширина опуклої частини рапорту на рівні 2 (С2) - 4.9мм
Ширина рапорту на рівні 2 (Шр2) - 8.2мм
Ширина опуклої частини рапорту на рівні 3 (С3) - 4.9мм
Ширина рапорту на рівні 3 (Шр3) - 7.9мм
Розрахункова ширина трубки полотна- 13см
Рекомендоване обладнання 2АНК 14-5 (діаметр 3,5 дюйма), 156 голок в циліндрі

а **б**

Рис. 4. Результати роботи програми LastikTube; а - тривимірна макромодель гетри; б-вихідні та розрахункові дані

Програма LastikTube дозволяє не тільки підібрати необхідний рапорт та параметри структури виробу, але й побудувати макромоделі, які в подальшому можуть бути використані для моделювання фізико-механічних властивостей трикотажу в умовах його експлуатації. Але для розширення сфери застосування розробленого програмного продукту необхідно сформувати базу даних деформаційних характеристик трикотажу ластичних переплетень з різних видів сировини.

Рис. 5. Тривимірна модель трубчастої ділянки жіночої майки-топу з бамбукової сировини, виробленої переплетенням ластик 2х2 (а) та 6х6 (б), одягненої на поверхню, побудовану відповідно до розмірних ознак 48-го розміру

Отримані у ході попередніх досліджень [16, 17] дані занесено у комп'ютерну програму LastikTube для формування внутрішньої бази деформаційних властивостей трикотажу ластичних переплетень. Макромоделі виробів, згенеровані у ході роботи програми, в подальшому можуть бути використані для

прогнозування споживних властивостей виробу у розрахункових інженерно-аналітичних комплексах, що забезпечують можливості реалізації віртуальних експериментів з дослідження таких фізико-механічних властивостей як деформаційні, теплопровідність, повітропроникність та інші.

Висновки: У ході дослідження проведено аналіз методів проєктування та виготовлення трикотажних виробів прилеглого силуету для поверхонь складної просторової форми. Встановлено, що трикотаж ластичних переплетень може забезпечити високі показники розтяжності та пружності без створення надлишкової компресії. Асортимент трикотажних виробів включає вироби трубчастої форми, такі як гетри, майки-топи, наколінники, мітенки, які можуть бути виготовлені на двофонтурному кругловязальному обладнанні ластичними переплетеннями без зміни параметрів режиму в'язання. Однак характер деформації розтягу трикотажу залежить від виду та рапорту переплетення, виду сировини, параметрів режиму в'язання. У ході дослідження запропоновано спосіб оцінки рівня комфортності розтягу трикотажного виробу трубчастої форми, виробленого переплетенням ластик різних рапортів. На підставі отриманих результатів розроблено алгоритм та комп'ютерну програму для автоматизованого проєктування трикотажних виробів трубчастої форми з урахуванням деформаційних властивостей трикотажу. Результати роботи програми включають текстовий файл з вихідними та розрахунковими даними, графічне представлення розподілу репрезентативного об'єму ниткової структури по поверхні трубки та тривимірну макромодель виробу, що відображає форму текстильної оболонки без деталізації на рівні ниток. У ході подальших досліджень сфера застосування розробленого програмного продукту може бути розширена за рахунок поповнення баз даних програми.

Література

1. Каюмова Р.Ф. К вопросу создания бесшовной одежды: прошлое и будущее // МНИЖ. 2018. №6-1 (72).

2. Hong, H., Filho, A.A., Fangueiro, R,& M D de Araujo (1994). The development of 3D shaped knitted fabrics for technical purposes on a flat knitting machine. Indian Journal of Fiber & Textile Research. Vol. 19, September 1994, pp. 189-194

3. Скляр Н.М. Тенденції розвитку технології та устаткування для виготовлення безшовного трикотажу / Н.М. Скляр // Вісник КНУТД. – 2007, №6. – С.135-140.

4. Лаврис Е.В. Объемные цельнотканые оболочки: классификация и методы изготовления. / Е.В.Лаврис // Дизайн. Материалы. Технология. – С.Пб.: СПГУТД. – 2009, № 1(8). – С.70-72.

5. Mengna1 G. Pressure and comfort perception in the system "female body–dress" / G. Mengna1, V.E. Kuzmichev // AUTEX Research Journal, Vol. 13, No 3, September 2013, pp. 71 – 78.

6. Нахайчук О.В., Захарова Е.А., Мізрах А.А., Горобчишина В.С. Прогнозування тиску текстильних матеріалів в системі «фігура-сукня». Вісник Хмільницького національного університету. – 2020, № 2, с.135-140

7. Умарова М.Н., Турахужаева Н.Н. Изучение влияния структуры трикотажного полотна на его свойства. Universum: Технические науки. – 2020, № 2 (71), с. 11-15.

8. Гайдамака В.К., Кизимчук О.П. Основи технології виробів заданої форми: підручник. К.: Кафедра, 2013. 216 с.

9. Галавська Л.Є. Теоретичні аспекти визначення розтяжності та закручуваності подвійного неповного трикотажу. / Л.Є. Галавська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – №2. – С. 107-110.

10. Галавська Л.Є. Дослідження розтяжності та закручуваності подвійного неповного трикотажу. / Л.Є. Галавська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – №3. – С. 80-85.

11. Шалов И.И. Основы проектирования трикотажного производства с элементами САПР: Учеб. для вузов.- 2-е изд., перераб. и доп./ Л.А. Кудрявин, И.И. Шалов - М.: Легпромбытиздат, 1989.- 288 с.

12. Застанченко О. Ю. Вивчення характеру перерозподілу нитки у трикотажі ластичних переплетень під дією розтягуючих зусиль / О. Ю. Застанченко. Т. В. Єліна, Л. Є. Галавська // Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion (31 жовтня 2019 р., м. Київ). - Київ : КНУТД, 2019. – С. 207-210.

13. Дианич М.М., Семак Б.Д. Ассортимент трикотажных изделий из смеси волоконю.-К.: Техніка, 1983. – 144 с., ил.,- Библиогр.: с.142-143

14. Максудов Н.Б. Анализ деформационных свойств высокоэластичных трикотажных полотен для проєктирования спортивных одежды / Н.Б. Максудов, Ф.У. Нигматова, Ж.К. Юлдашев, Р.Р. Абдувалиев//Технические науки: электрон. научн. журн. -2018, № 9(54. – С.12-16.

15. Єліна Т.В. Створення параметричної моделі поверхні трикотажу переплетення ластик 2+2 / Т.В. Єліна, Л.Є. Галавська, О.П. Манойленко // Вісник КНУТД. – 2019, №2 (132) . - С 80-89

16. Зубрицька Г.В. Вивчення процесу одноосної деформації трикотажу переплетення ластик 2+2 під дією розтягуючого зусилля / Г.В. Зубрицька, Т.В. Єліна, Л.Є. Галавська // Вісник ХНУ №3(285). 2020. – С. 222-226.

17. Єліна Т.В. Вивчення процесу одновісного розтягу трикотажу переплетення ластик різних рапортів / Т.В. Єліна, А.В. Пухова, В.П. Романюк, Л.Є. Галавська // Вісник КНУТД – 2020, №4, с.

18. Омельченко В.Д. Конструювання трикотажних виробів та основи швейно-трикотажного виробництва: навч. посіб. / В.Д. Омельченко, Л.Є. Галавська, Т.І. Розсоха. – К.: Кафедра, 2016. – 440 с.

References

1. Kayumova R.F. K voprosu sozdaniya besshovnoy odezhdy: proshloe i budushchee // MNIZh. 2018. №6-1 (72).

2. Hong, H., Filho, A.A., Fangueiro, R,& M D de Araujo (1994). The development of 3D shaped knitted fabrics for technical purposes on a flat knitting machine. Indian Journal of Fiber & Textile Research. Vol. 19, September 1994, pp. 189-194

3. Skliar N.M. Tendentsii rozvytku tekhnolohii ta ustatkuvannia dlia vyhotovlennia bezshovnoho trykotazhu / N.M. Skliar // Visnyk KNUTD. – 2007, №6. – C.135-140.

4. Lavris E.V. Ob"emnye tsel'notkanye obolochki: klassifikatsiya i metody izgotovleniya. /E.V.Lavris // Dizayn. Materialy. Tekhnologiya. – S.Pb.: SPGUTD. – 2009, ¬ № 1(8). – S.70-72.

5. Mengna1 G. Pressure and comfort perception in the system “female body–dress” / G. Mengna1, V. E. Kuzmichev // AUTEX Research Journal, Vol. 13, No 3, September 2013, pp. 71 – 78.

6. Nakhaichuk O.V., Zakharova E.A., Mizrakh A.A., Horobchyshyna V.S. Prohnozuvannia tysku tekstylnykh materialiv v systemi «fihura-suknia». Visnyk Khmilnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2020, № 2, s. 135-140.

7. Umarova M.N., Turakhuzhaeva N.N. Izuchenie vliyaniya struktury trikotazhnogo polotna na ego svoystva. Universum: Tekhnicheskie nauki. – 2020, № 2 (71), s. 11-15.

8. Haidamaka V.K., Kyzymchuk O.P. Osnovy tekhnolohii vyrobiv zadanoi formy: pidruchnyk. K. : Kafedra, 2013. 216 s.

9. Halavska L.Ye. Teoretychni aspekty vyznachennia roztiazhnosti ta zakruchuvanosti podviinoho nepovnoho trykotazhu. / L.Ye. Halavska // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2015. – №2. – S. 107-110.

10. Halavska L.Ye. Doslidzhennia roztiazhnosti ta zakruchuvanosti podviinoho nepovnoho trykotazhu. / L.Ye. Halavska // Herald of Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2015. – №3. – S. 80-85.

11/ Shalov I.I. Osnovy proektirovaniya trikotazhnogo proizvodstva s elementami SAPR: Ucheb. dlya vuzov.- 2-e izd., pererab. i dop./ L.A. Kudryavin, I.I. Shalov - M.: Legprombytizdat, 1989.- 288 s.

12. Zastanchenko O. Yu. Vyvchennia kharakteru pererozpodilu nytky u trykotazhi lastychnykh perepleten pid diieiu roztiahuiuchykh zusyl / O. Yu. Zastanchenko. T. V. Yelina, L. Ye. Halavska // Zbirnyk materialiv III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii tekstylnykh ta feshn tekhnolohii KyivTex&Fashion (31 zhovtnia 2019 r., m. Kyiv). - Kyiv : KNUTD, 2019. - S. 207-210.

13. Dianich M.M., Semak B.D. Assortiment trikotazhnykh izdeliy iz smesi volokonyu.-K.: Tekhnika, 1983. – 144 s., il.,- Bibliogr.: s. 142-143

14. Maksudov N.B. Analiz deformatsionnykh svoystv vysokoelastichnykh trikotazhnykh poloten dlya proєktirovaniya sportivnykh odezhdy / N.B. Maksudov, F.U. Nigmatova, Zh.K. Yuldashev, R.R. Abduvaliev//Tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. -2018, № 9(54. – S.12-16.

15. Yelina T.V., Stvorennia parametrychnoi modeli poverkhni trykotazhu perepletennia lastyk 2+2/ Yelina T.V., Halavska L.Ye., Manoilenko O.P., // Visnyk KNUTD. – 2019, №2 (132) - S 80-89

16. Zubrytska H.V. Vyvchennia protsesu odnoosnoi deformatsii trykotazhu perepletennia lastyk 2+2 pid diieiu roztiahuiuchoho zusyllia // H.V. Zubrytska, T.V. Yelina, L.Ye. Halavska // Visnyk KhNU №3(285). 2020. – S. 222-226.

17.Yelina T.V. Vyvchennia protsesu odnovisnoho roztiahu trykotazhu perepletennia lastyk riznykh raportiv // T.V. Yelina, A.V. Pukhova, V.P. Romaniuk, L.Ye. Halavska./ Visnyk KNUTD – 2020, №4, s.

18. Omelchenko V.D. Konstruiuvannia trykotazhnykh vyrobiv ta osnovy shveino-trykotazhnoho vyrobnytstva: navch. posib. / V.D. Omelchenko, L.Ye. Halavska, T.I. Rozsokha. – K.: Kafedra, 2016. – 440 s.

Надійшла / Paper received : 13.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-175-179
УДК 675.023

Т. О. КОЛЕСНИК, О. А. АНДРЕЄВА
Київський національний університет технологій та дизайну

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДГОТОВЧИХ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕРГАМЕНТУ

Метою роботи було визначити раціональні параметри відмочувально-зольних процесів у виробництві шкіряного пергаменту з використанням сучасних матеріалів – протеолітичного ферментного препарату для відмочування та природного мінералу цеоліту для зоління для виключення шкідливого сульфіду натрію та зменшення витрати гідроксиду кальцію.

Ключові слова: шкіряний пергамент, відмочувально-зольні процеси, параметри, показники.

T. O. KOLESNYK, O. A. ANDREYEVA
Kyiv National University of Technologies and Design

OPTIMIZATION OF PARAMETERS PREPARATORY PROCESS IN THE PRODUCTION OF PARCHMENT

In the conditions of fierce competition between leather producers in Europe, Ukrainian enterprises need to constantly update and expand their range in order to successfully sell their products. Predicting the properties of finished leather products is possible by improving existing and developing new technologies through the use of effective, environmentally friendly chemical materials that are able to provide functional, consumer and production and economic requirements for these products [1]. The correct choice of materials for leather processing is based not only on their compatibility with collagen and other chemicals used, but also on the rational use of material resources, as it determines the economic feasibility of development [2,3].

To further improve the technology of manufacturing leather parchment in the direction of improving the environmental imperative and product quality, the goal of this work is formulated - to determine the rational parameters of the preparatory processes when using an enzyme preparation during soaking and zeolite during ashing. The object of the study is the preparatory processes for the production of this type of leather, and the subject is the optimization of the parameters of soaking and cindering by determining the consumption of the materials used. To obtain objective experimental data, we used chemical, physical and mechanical methods for analyzing natural leather. To determine the parameters of the soaking-ash processes, the method of a full factorial experiment of type 23 was used, which made it possible to minimize the number of experiments, build a mathematical model of the process, and choose the most optimal option. On the basis of the mathematical planning of the experiment, the rational costs of the enzyme preparation by), calcium hydroxide, zeolite (natural mineral of the Sokirnitsa deposit) for soaking-ash processes were established in order to improve the ecological state of the environment and product quality. We predict that the introduction of the new technology will also be economically feasible due to the increased yield of leather by area; and an increase in profits will contribute to an increase in the grade of finished products.

Keywords: leather parchment, soaking-ash processes, parameters, indicators.

Вступ

В умовах жорсткої конкуренції між виробниками шкір у Європі підприємствам України для успішної реалізації своєї продукції необхідно постійно оновлювати та розширювати її асортимент. Прогнозування властивостей готових шкіряних виробів можливо за рахунок удосконалення існуючих та розроблення нових технологій шляхом застосування ефективних, екологічно безпечних хімічних матеріалів, які здатні забезпечувати функціонально-споживчі та виробничо-економічні вимоги до цих виробів [1]. При цьому правильний вибір матеріалів для оброблення шкіри ґрунтується не лише на їх сумісності з колагеном та іншими застосованими хімічними реагентами, а й на раціональному використанні матеріальних ресурсів, оскільки визначає економічну доцільність розробки [2,3].

Шкіряний пергамент є унікальним наноструктурованим матеріалом, проте, питанням його виготовлення та дослідження приділяється дуже мало уваги. Аналіз літератури показав, що важливу роль у технологічному циклі виготовлення цього матеріалу займають підготовчі процеси, проведення яких за відомими технологіями [4-7] негативно впливає на навколишнє середовище через використання, насамперед, сульфіду натрію − найбільш загрозливого забруднювача промислових стоків шкідливими для гідробіонтів сірковмісними сполуками, а також через утворення шламу гідроксиду кальцію.

У попередніх роботах [8,9] авторами розглянута можливість використання у підготовчих процесах виготовлення пергаменту екологічно безпечних матеріалів − протеолітичного ферментного препарату (фірма Oropon TFL, Італія) та цеоліту (природного мінералу Сокирницького родовища) з метою заміни сульфіду натрію та зменшення витрати гідроксиду кальцію. Експериментально встановлено, що відмочування в присутності цього ферментного препарату з подальшим золінням з використанням гідроксиду кальцію в комбінації з цеолітом позитивно впливають на міцність шкіри, її вихід по об'єму та площі.

Для подальшого удосконалення технології виготовлення шкіряного пергаменту (у подальшому просто «пергаменту») у напряму покращення екологічного імперативу та якості продукції сформульовано мету даної роботи − визначити раціональні параметри підготовчих процесів у разі використання ферментного препарату при відмочуванні та цеоліту при золінні. За об'єкт дослідження обрано підготовчі процеси виробництва цього виду шкіри, за предмет − оптимізацію параметрів відмочування та зоління шляхом визначення витрати застосованих матеріалів.

Експериментальна частина

Для отримання об'єктивних експериментальних даних у роботі використано хімічні та фізико-механічні аналітичні методи [10]. Для визначення параметрів відмочувально-зольних процесів застосували метод повного факторного експерименту типу 2^3, що дозволило мінімально обмежити кількість дослідів, побудувати математичну модель процесу, обрати найбільш оптимальний варіант [11].

Після серії попередніх дослідів визначили такі найбільш важливі фактори як: X_1 – витрата ферментного препарату для процесу відмочування, %; X2 та X3 – відповідно витрата гідроксиду кальцію та цеоліту для процесу зоління, г/л , а також їх рівні варіювання (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика плану експерименту

Рівні та інтервал варіювання	X_1 витрата ферментного препарату, %	X_2 витрата гідроксиду кальцію, %	X_3 витрата цеоліту, %
Основний рівень	0,5	10,0	2,5
Інтервал варіювання	0,3	5,0	1,0
Верхній рівень	0,8	15,0	3,5
Нижній рівень	0,2	5,0	1,5

Дослідження виконували в лабораторних умовах у скляних ємностях об'ємом 1 л на установці для збовтування, завдяки чому забезпечувалися необхідний температурний режим та перемішування (частота обертання 8-10 хв-1). У якості вихідної сировини використали овчину, при цьому для виключення впливу топографічних ділянок групи комплектували за методом асиметричної бахроми. Умови оброблення наведено у табл. 2-3.

Таблиця 2

Параметри відмочувально-зольних процесів

Процес	РК	Температура, °С	Витрата матеріалу, г/л	Тривалість, год	Примітка
Промивання	4	20-25	Вода	0,5	Постійне обертання
Відмочування	4	30-35	Таблиця 2	6,0	Те саме
Промивання	4	початкова 28-30 кінцева 20-25	Вода	0,5	-«-«-«-«-
Міздріння	–	–	–	–	–
Промивання	4	20-25	Вода	0,5	Постійне обертання
Зоління	4	25-26	Таблиця 2	18,0	Перемінний режим

За вихідні змінні (функції відгуку) обрали показники голини, які дають достатньо повне уявлення про ефективність відмочувально-зольних процесів: Y1 – температура зварювання, °С; Y2 – загальна деформація, %; Y3 – виплавлення желатину, %. Для статистичного оброблення одержаних даних й отримання математичної моделі процесів відмочування та зоління застосували критерії Стьюдента t, який дозволяє встановити значущість коефіцієнтів рівняння регресії, Фішера F – виявляє адекватність /правомірність/ встановлених залежностей та Кохрена *G* – підтверджує відтворюваність результатів експерименту з використанням комп'ютерної програми MathCAD [11].

Таблиця 3

Витрата матеріалів

Група	Витрата, г/л				
	Відмочування		Зоління		
	фермент	Карбонат натрію	Гідроксид кальцію	цеоліт	Сульфід натрію
1	0,8	1,5	15,0	3,5	-
2	0,8	1,5	15,0	1,5	-
3	0,8	1,5	5,0	3,5	-
4	0,8	1,5	5,0	1,5	-
5	0,2	1,5	15,0	3,5	-
6	0,2	1,5	15,0	1,5	-
7	0,2	1,5	5,0	3,5	-
8	0,2	1,5	5,0	1,5	-

Результати дослідження

Ніяких ускладнень при проведенні відмочувально-зольних процесів не спостерігалося. Після оброблення результатів експерименту (табл. 4) отримали адекватні математичні рівняння регресії (1-3) в кодованих одиницях, які описують залежності найбільш вагомих показників готової шкіри від витрати основних матеріалів. При цьому коефіцієнти при незалежних змінних вказують на ступінь впливу факторів. Так, чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим більший вплив чинить фактор. Якщо коефіцієнт має знак плюс, то зі збільшенням значення фактора параметр оптимізації збільшується, а якщо мінус, то зменшується. Величина коефіцієнта відповідає внеску даного фактора у величину параметра оптимізації при переході фактора з нульового рівня на верхній або нижній

Таблиця 4

Значення факторів і параметри оптимізації

Група	Значення факторів			Значення функцій відгуку								
				Температура зварювання, °С			Загальна деформація, %			Виплавлення желатину, %		
	X_1	X_2	X_3	$Y_{1u'}$	$Y_{1u''}$	Y_{1u}	$Y_{2u'}$	$Y_{2u''}$	Y_{2u}	$Y_{3u'}$	$Y_{3u''}$	Y_{3u}
1	+1	+1	+1	54,0	54,5	54,3	69,4	69,1	69,3	9,9	9,9	9,9
2	+1	+1	-1	56,0	56,0	56,0	62,9	64,5	63,7	12,1	11,0	11,6
3	+1	-1	+1	64,0	63,0	63,5	43,8	44,0	43,9	7,9	7,7	7,8
4	+1	-1	-1	62,0	63,0	62,5	53,1	56,5	54,8	8,7	7,8	8,3
5	-1	+1	+1	61,5	61,0	61,3	64,0	63,8	63,9	10,0	9,6	9,8
6	-1	+1	-1	60,0	60,0	60,0	61,4	60,0	60,7	10,5	10,2	10,4
7	-1	-1	+1	63,0	62,5	62,8	56,3	62,0	59,2	8,3	9,6	8,9
8	-1	-1	-1	66,0	65,0	65,5	49,7	50,8	50,3	8,0	7,0	7,5

Температура зварювання

$$\hat{Y}_1 = 60,72 - 1,66X_1 - 2,84X_2 - 1,09X_1X_2 - 0,84X_1X_2X_3 \quad (1)$$

Критерій Фішера = 1,28 < $F_{табл}$ = 3,69 (рівень значущості α = 0,05; число ступенів свободи у знаменнику f1 = 8; число ступенів свободи у числівнику f2 = 6), рівняння адекватне. Похибка досліду 0,68 %.

Критерій Кохрена = 0,27 < $G_{табл}$ = 0,68 (рівень значущості α = 0,05; число ступенів свободи f1 = m – 1 = 1; число ступенів свободи f2 = N = 8), дисперсія відтворювана, похибка досліду 0,47 %.

Критерій Стьюдента = 2,31, тоді tb_0 = 354,74 > $t_{табл}$, значущий; tb_1 = 9,68 > $t_{табл}$, значущий; tb_2 = 16,61 > $t_{табл}$, значущий; tb_3 = 1,64 < $t_{табл}$, незначущий; tb_{12} = 6,39 > $t_{табл}$, значущий; tb_{13} = 0,55 < $t_{табл}$, незначущий; tb_{23} = 0,91 < $t_{табл}$, незначущий; tb_{123} = 4,93 > $t_{табл}$, значущий. Похибка досліду 0,1 %.

Аналізуючи отримане рівняння 1, можна зробити висновок, що гідротермічна стійкість (тобто показник температури зварювання) знижується з підвищенням витрати ферментного препарату (X_1) та гідроксиду кальцію (X_2); при цьому внесок фактора «витрата гідроксиду кальцію» у даний парамер оптимізації майже вдвічі більший від внеска фактора «витрата ферментного препарату». Вплив витрати цеоліту на температуру зварювання не виявлений. Виявлено негативний взаємний вплив витрати ферментного препарату та гідроксиду кальцію (X_1X_2), а також всіх трьох факторів ($X_1X_2X_3$), проте, відсутній ефект взаємодії витрати ферментного препарату та витрати цеоліту (X_1X_3). Позитивний ефект взаємодії двох і трьох факторів може мати знак плюс, якщо від‘ємні знаки будуть у одного з факторів у першому випадку або парного числа факторів (нуль або у будь-яких двох) у другому.

Загальна деформація

$$\hat{Y}_2 = 58,21 + 6,18X_3 + 2,38X_1X_2 - 2,18X_1X_3 + 2,77X_1X_2X_3 \quad (2)$$

Критерій Фішера = 2,22 < $F_{табл}$ = 3,69 (рівень значущості α = 0,05; число ступенів свободи у знаменнику f1 = 8; число ступенів свободи у числівнику f2 = 6), рівняння адекватне. Похибка досліду 2,5 %.

Критерій Кохрена = 0,65 < $G_{табл}$ = 0,68 (рівень значущості α = 0,05; число ступенів свободи f1 = m – 1 = 1; число ступенів свободи f2 = N = 8), дисперсія відтворювана, похибка досліду 6,2 %.

Критерій Стьюдента = 2,31, тоді tb_0 = 93,18 > $t_{табл}$, значущий; tb_1 = 0,47 < $t_{табл}$, незначущий; tb_2 = 9,89 > $t_{табл}$, значущий; tb_3 = 1,35 < $t_{табл}$, незначущий; tb_{12} = 3,81 > $t_{табл}$, значущий; tb_{13} = 3,49 > $t_{табл}$, значущий; tb_{23} = 2,15 < $t_{табл}$, незначущий; tb_{123} = 4,43 > $t_{табл}$, значущий. Похибка 0,1 %.

Рівняння 2 показує те, що на загальну деформацію найбільший вплив має витрата природного мінералу (X_3): чим вона більше, тим більше значення даного параметра оптимізації. Інтерпретація ефектів взаємодії не така однозначна, як інтерпретація лінійного ефекту. Так, одна із значимих взаємодій – витрати ферментного препарата та витрати гідроксиду кальцію (X_1X_2) – має позитивний знак. Це свідчить про те, що одночасне збільшення, як і одночасне зменшення, значень цих факторів призводить до збільшення параметра оптимізації (без урахування лінійних ефектів). Інша взаємодія – витрати ферментного препарата та витрати цеоліту (X_1X_3) – має від‘ємний знак, тому її ефективність зростатиме у разі протилежних рівнів цих факторів. Оскільки у цьому рівнянні значущим виявився ефект взаємодії трьох факторів ($X_1X_2X_3$), то він може мати знак плюс, якщо від‘ємні знаки будуть у парного числа факторів (нуль або будь-які два). Знак мінус буде, якщо непарне число чинників має знак мінус (всі три або будь-який один).

Виплавлення желатину

$$\hat{Y}_3 = 9,26 + 1,14X_2 \quad (3)$$

Критерій Фішера = 1,67 < $F_{табл}$ = 3,69 (рівень значущості α = 0,05; число ступенів свободи у знаменнику f1 = 8; число ступенів свободи у числівнику f2 = 5), рівняння адекватне. Похибка досліду 0,79 %.

Критерій Кохрена = 0,34 < $G_{табл}$ = 0,68 (рівень значущості α = 0,05; число ступенів свободи f1 = m – 1 = 1; число ступенів свободи f2 = N = 8), дисперсія відтворювана, похибка досліду 0,63 %.

Критерій Стьюдента = 2,31, тоді $tb_0 = 46,86 > t_{табл}$, значущий; $tb_1 = 0,57 < t_{табл}$, незначущий; $tb_2 = 5,76 > t_{табл}$, значущий; $tb_3 = 0,76 < t_{табл}$, незначущий; $tb_{12} = 1,08 < t_{табл}$, незначущий; $tb_{13} = 1,9 < t_{табл}$, незначущий; $tb_{23} = 2,02 < t_{табл}$, незначущий; $tb_{123} = 0,51 < t_{табл}$, незначущий. Похибка 0,1 %.

З рівняння 3 видно, що на виплавлення желатину впливає лише витрата гідроксиду кальцію (X_2): чим вона вище, тим вище даний показник.

Аналіз отриманих рівнянь (1–3) дозволяє зробити висновок, що на показники оптимізації параметрів відмочувально-зольних процесів в обраному факторному діапазоні всі фактори мають різний вплив. Отримана математична модель підготовчих процесів, свідчить про те, що дані значень критерію оптимізації знаходиться в межах досліджуваного факторного простору.

Крім оцінювання впливу умов підготовчих процесів на показники шкіряного напівфабрикату у вигляді голини, не менш важливим було з'ясування їх впливу на показники вичиненої шкури (готового пергаменту). З цією метою для порівняння обробили ще одну, контрольну групу 9к за відомою технологією, що передбачає використання сульфіду натрію при відмочуванні та золінні при витраті 0,7 та 9,0 г/л відповідно; витрата гідроксиду кальцію при золінні 15 г/л. Після сушіння та оздоблення зразків пергаменту всіх груп виконали їх фізико-механічні випробування, одержані результати наведено у табл. 5. Остаточний вибір найбільш раціонального варіанту оброблення в межах проведеного експерименту здійснювали на підставі розрахунку узагальненої багатокритеріальної цільової функції $У_{заг,г}$ [12] для показників готового пергаменту.

Таблиця 5

Фізико-механічні показники пергаменту

Група	Межа міцності при розтягу, 10 МПа	Відносне видовження при розриві, %	Температура зварювання, °С	Товщина, мм	$У_{заг,г}$
1	4,8	37,0	64,0	0,86	0,059
2	6,0	34,0	60,5	0,66	0,083
3	6,7	37,0	66,0	0,72	0,036
4	4,0	36,0	64,0	0,74	0,078
5	5,9	29,0	63,5	0,52	0,098
6	6,8	40,5	62,0	0,72	0,056
7	6,3	40,0	65,0	0,70	0,041
8	6,9	29,0	68,0	0,56	0,083
9*к*	5,9	40,0	68,0	0,64	0,061

З табл. 5 видно, що найменші значення узагальненої багатокритеріальної цільової функції $У_{заг,г}$ = 0,036-0,041, тобто найбільш прийнятні умови відмочувально-зольних процесів виготовлення пергаменту з овчини у дослідних групах 3 та 7 при витраті ферментного препарату 0,8 та 0,2 г/л, гідроксиду кальцію – 5 г/л, а цеоліту – 3,5 г/л.

Висновок

З метою удосконалення технології виготовлення шкіряного пергаменту у напряму розширення асортименту хімічних матеріалів та готової продукції, підвищення рівня екологізації виробництва за допомогою методів математичного планування експерименту та багатокритеріальної оптимізації встановлено раціональні параметри підготовчих процесів: витрата протеолітичного ферментного препарату при відмочуванні 0,2-0,8 г/л, а гідроксиду кальцію та цеоліту при золінні відповідно 5,0 та 3,5 г/л.

Проводиться промислова апробація одержаних результатах.

Література

1. Горбачов А. А., Кернер С. М., Андреєва О. А., Орлова О. Д. Основи створення сучасних технологій виробництва шкіри та хутра : монографія. Київ : КНУТД, 2007. 190 с.

2. Курівчак Я. В., Охмат О. А., Горбачов А. А. Визначення оптимальних параметрів відмочувально-зольних процесів для усунення складчастості з поверхні шкур великої рогатої худоби. Вісник ХНУ. 2010. № 3 С. 125-129.

3. Ліщук В. І., Войцеховська Т. Г., Данилкович А. Г. Використання багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимальної ділянки процесу зоління. Легка промисловість, 2007. №1. С. 37–39.

4. Коль Луи. Квасцовое и замшевое дубление / под ред. И. Г. Манохина. Москва : ОНТИ, 1932. 38 с.

5. А. с. 704990 СССР, МКИЗ С14С 13/00. Способ получения писчего пергамента из шкур / А. М. Игнатов, Л. А. Шлякова, В. Т. Сарычева, М. М. Дорофеев (СССР). – № 2471699/28-12; заявл. 29.03.77; опубл. 25.12.79, Бюл. № 47.

6. Patent 4310328 U.S., Appl. No.: 122,041, C14 C1 / 06. Process for liming pelts of animal hides and skins / Inventors: R. Monsheimer, E. Pfleiderer // Filed: Feb. 19, 1980; Posted: Jan. 12, 1982.

7. Гайдаров Л. П. Технология кожи. Москва : Легкая индустрия, 1974. 174 с.

8. Колесник Т. О., Андреєва О. А. Дослідження процесу відмочування шкіряної сировини в присутності ферментних препаратів. Вісник ХНУ. 2020. № (267) С. 251–254.

9. Атаманова А. А., Колесник Т. О., Андреєва О. А. Сучасні дослідження властивостей та використання ферментів Вісник ХНУ. 2020. № 5 (267) С.

10. Головтеева А. А., Куциди Д. А., Санкин Л. Б. Лабораторный практикум по химии и технологии кожи и меха ; под ред. И. П. Страхова. Москва : Легкая индустрия, 1982. 312 с.

11. Холоднов В. А., Лебедева М. Ю. Системный анализ и принятие решений. Решение задач оптимизации химико-технологических систем в среде Mathcad и Excel. Санкт-Петербург, 2005. 220 с.

12. Радченко С. Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем. Київ, 2002. 88 с.

References

1. Gorbachev A. A., Kerner S. M., Andreeva O. A., Orlova O. D. Fundamentals of the creation of modern technologies for the production of leather and fur: monograph. Kiev : KNUTD, 2007. 190 s.

2. Kurivchak Ya., Okhmat O. A., Gorbachev A. A. Determination of the optimal parameters of soaking-ash processes to eliminate folding from the surface of cattle skins. Bulletin of KhNU. 2010. № 3 P. 125-129.

3. Lishchuk VI, Voytsekhovskaya TG, Danilkovich AG Using bagatokralny optimization to determine the optimal area of the ash process. Kiev: Light industry, 2007. №1. P. 37-39.

4. Kohl Louis. Alum and suede tanning / ed. I. G. Manokhina. Moscow: ONTI, 1932.38 s.

5. A.S. 704990 USSR, MKI3 S14S 13/00. Method of obtaining writing parchment from skins / A. M. Ignatov, L. A. Shlyakova, V. T. Sarycheva, M. M. Dorofeev (USSR). - No. 2471699 / 28-12; declared 03/29/77; publ. 12/25/79, Bul. No. 47.

6. Patent 4310328 U.S., Appl. No.: 122,041, C14 C1 / 06. Process for liming pelts of animal hides and skins / Inventors: R. Monsheimer, E. Pfleiderer // Filed: Feb. 19, 1980; Posted: Jan. 12, 1982.

7. Gaidarov L. P. Leather technology. Moscow: Light Industry, 1974. 174 s.

8. Kolesnyk T. O. Study of the process of soaking raw leather in the presence of enzyme preparations / T. O. Kolesnyk, O. A. Andreeva // Bulletin KhNU. 2020 №. (267) P. 251-254.

9. Atamanova A. A., Kolesnyk T. O., Andreeva O. A Modern studies of properties and use of enzymes. Bulletin of KhNU. 2020 №. 5 (267) P.

10. Golovteeva A. A., Kutsidy D. A., Sankin L. B. Laboratory workshop on chemistry and technology of leather and fur; ed. I. P. Strakhova. Moscow: Light Industry, 1982. 312 s.

11. Holodnov V. A., Lebedeva M. Yu. System analysis and decision making. Solution of optimization problems for chemical-technological systems in Mathcad and Excel. St. Petersburg. 2005. 220 s.

12. Radchenko S. G. Mathematical modeling and optimization of technological systems. Kyiv, 2002. 88 s.

Надійшла / Paper received : 02.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-180-184
УДК 637.2.05

О.М. КУНИК, А.С. НАГРЕБЕЛЬНА, Д.Г. САРІБЄКОВА
Херсонський національний технічний університет

ТЕХНОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА ВЕРШКОВОГО МАСЛА

В статті проведено технологічну експертизу промислових зразків вершкового масла. Визначено правильність маркування, органолептичні та фізико-хімічні показники промислових зразків вершкового масла згідно чинної нормативної документації. Для виявлення технологічних порушень при виготовлені вершкового масла у ході роботи додатково застосовано фізичні методи: рефрактометрії та люмінесценції. В результаті проведеного дослідження виявлено факт асортиментної фальсифікації – заміна вершкового масла рослинними оліями.

Ключові слова: технологічна експертиза, вершкове масло, масова частка жиру, домішки рослинних жирів.

O.M. KUNIK, A.S. NAGREBELNA, D.G. SARIBYEKOVA
Kherson National Technical University

TECHNOLOGICAL EXPERTISE OF BUTTER

The article examines the technological expertise of industrial samples of butter.

Butter is a food product made from cream, which has a specific taste, smell and plastic consistency, with a milk fat content of not less than: 61.5 – 72.4% – sandwich butter, 72.5 – 79.9% – country butter, 80.0 – 85.0% – extra butter, which is a homogeneous emulsion of the type «water in fat».

Various defects of a taste, a scent, color and a consistence of butter arise at use of low-quality raw materials, infringement of a technological mode of manufacturing, storage and realization of finished goods.

The purpose of the work was to conduct a technological expertise of butter samples.

Samples of butter with a fat content of 72.8 – 73% were selected as the object of the study, the trademarks of which are presented in the trade network of the Kherson region: TM «Chutyanka», TM «Slavia», TM «Yagotynske», TM «Ferma», TM «Vershkova dolyna».

It was found that the labeling of the studied industrial samples of butter was performed correctly – the necessary information about the food product is fully applied to the packaging.

It was established that the studied samples of butter TM «Chutyanka», TM «Slavia», TM «Yagotynske» and TM «Ferma» belong to the highest grade. The sample of butter of TM «Bilotserkivske»due to defects of taste and cent, as well as excessive softness belongs to 1 grade.

It is established that according to the indicators of mass fraction of fat, titrated acidity of fat phase, plasma pH and mass fraction of table salt, the studied samples of butter TM «Slavia», TM «Yagotynske», TM «Ferma» and TM «Bilotserkivske» meet the requirements of DSTU 4399: 2005 «Butter. Specifications». The sample of butter TM «Chutyanka» in terms of mass fraction of fat – 71.65% should be attributed to the group «butter sandwich».

Irradiation of butter samples with luminescent rays showed that the sample of butter TM «Chutyanka» due to the content of vegetable fats is a product of falsification, and cannot position itself as «sweet butter».

It was established that the samples of butter of TM «Slavia», TM «Yagotynske», TM «Ferma» and TM «Bilotserkivske» contain only milk fat. The refractive indices of the sample of butter TM «Chutyanka» and the sample of spread TM «Vershkova dolyna» indicate the presence of impurities of vegetable fats.

Key words: technological expertise, butter, mass fraction of fat, impurities of vegetable fats.

Постановка проблеми

Згідно ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове. Технічні умови» вершкове масло – це харчовий продукт, що виробляють з вершків та (або) продуктів перероблення молока, який має специфічний притаманний йому смак, запах та пластичну консистенцію за температури 12±2°С, з вмістом молочного жиру не меншим ніж: 61,5 – 72,4% – вершкове масло бутербродне, 72,5 – 79,9% – вершкове масло селянське, 80,0 – 85,0% – вершкове масло екстра, що становить однорідну емульсію типу «вода в жирі» [1].

Вершкове масло виготовляють із доброякісних солодких вершків, одержаних із пастеризованого молока, або із вершків, заквашених чистими культурами молочнокислих бактерій. Різноманітні вади смаку, запаху, кольору й консистенції вершкового масла виникають при використанні неякісної сировини, порушенні технологічного режиму виготовлення, зберігання й реалізації готової продукції [2].

Фальсифікація коров'ячого вершкового масла може здійснюватися шляхом [3]:

- зниженням вмісту жиру;
- введенням домішок, які не передбачені рецептурою;
- додаванням хімічних барвників та ароматизаторів;
- зниженням маси компонентів, передбаченої рецептурою.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягала в проведенні технологічної експертизи зразків вершкового масла українського виробництва.

Виклад основного матеріалу

У якості об'єкту дослідження було обрано зразки вершкового масла жирністю 72,8 – 73%, торгові марки яких представлені у торговій мережі Херсонської області: ТМ «Чутянка», ТМ «Славія», ТМ «Яготинське», ТМ «Ферма», ТМ «Білоцерківське». Для порівняння органолептичних та фізико-хімічних властивостей в роботі також досліджувався зразок рослинно-молочної суміші (спред) ТМ «Вершкова долина», рис. 1.

Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків вершкового масла та спреду в упаковці: а – ТМ «Чутянка», б – ТМ «Славія», в – ТМ «Яготинське», г – ТМ «Ферма», д – ТМ «Білоцерківське», е – ТМ «Вершкова долина»

На першому етапі роботи проводилося визначення правильності маркування досліджуваних зразків вершкового масла та зразка спреду згідно Закону України «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» (введення в дію від 06.08.2019 р.) [4], табл. 1.

Аналіз представлених даних свідчить, що маркування нанесене правильно, в повному обсязі, без порушень.

На наступному етапі роботи проводилося визначення органолептичних характеристик та сортності досліджуваних зразків вершкового масла та зразка спреду за бальною шкалою, запропонованою Ф.Ф. Гладким та ін. [5], табл. 2.

Таблиця 1

Перевірка маркування досліджуваних зразків вершкового масла

Показник	Зразок					
	ТМ «Чутянка»	ТМ «Славія»	ТМ «Яготинське»	ТМ «Ферма»	ТМ «Білоцерківське»	ТМ «Вершкова долина»
Назва харчового продукту	+	+	+	+	+	+
Склад харчового продукту	+	+	+	+	+	+
Кількість харчового продукту	+	+	+	+	+	+
Мінімальний термін придатності або дата «вжити до»	+	+	+	+	+	+
Будь-які особливі умови зберігання та/або умови використання	+	+	+	+	+	+
Найменування та місцезнаходження оператора ринку харчових продуктів, відповідального за інформацію про харчовий продукт, а для імпортованих харчових продуктів – найменування та місцезнаходження імпортера	+	+	+	+	+	+
Країна походження або місце походження	+	+	+	+	+	+
Інформація про ГМО в складі харчового продукту	+	+	+	+	+	+
Інформація про поживну цінність харчового продукту	+	+	+	+	+	+

Таблиця 2

Результати органолептичного дослідження

Показник, бали	Зразок					
	ТМ «Чутянка»	ТМ «Славія»	ТМ «Яготинське»	ТМ «Ферма»	ТМ «Білоцерківське»	ТМ «Вершкова долина»
Смак і запах	42	43	50	50	37	50
Консистенція, обробка і зовнішній вигляд	25	25	25	25	22	25
Колір	5	5	5	5	5	5
Посіл	10	10	10	10	10	10
Упаковка та маркування	10	10	10	10	10	10
Оцінка	92	93	100	100	84	100

Примітка: До вищого сорту відносять масло із загальною бальною оцінкою 88 – 100, в тому числі за смаком і запахом не менше 41 бал; до першого сорту – відповідно 80 – 87 і 37 балів.

При визначенні органолептичних характеристик (табл. 2) встановлено, що досліджувані зразки вершкового масла ТМ «Чутянка», ТМ «Славія», ТМ «Яготинське» та ТМ «Ферма» відносяться до вищого сорту.

Зразок масла ТМ «Білоцерківське» має запах та смак з вираженими домішками нафтового походження, тому не може бути віднесений до вищого сорту (оцінка за смак і запах – 37). Також даний зразок має надмірну м'якість, яка відповідає 1 сорту. Слід відмітити досить гарні органолептичні властивості рослинно-молочної суміші (спреду) ТМ «Вершкова долина».

Визначення фізико-хімічних показників було розділено на 2 етапи: спочатку в роботі проводилось визначення нормованих фізико-хімічних показників, вказаних у ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове. Технічні умови», потім – визначення додаткових фізико-хімічних показників, характеристика яких спрямована на виявлення фальсифікації або будь-яких інших технологічних порушень.

Так, за ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове. Технічні умови» в роботі проводили визначення масової частки жиру, титрованої кислотності жирової фази, pH плазми та масової частки кухонної солі (табл. 3)

Відповідно до отриманих результатів (табл. 3), у жодного зразка окрім ТМ «Чутянка» не виявлено асортиментної фальсифікації – масова частка жиру відповідає вимогам до масла вершкового селянського. ТМ «Чутянка» не відповідає цим вимогам і не може видавати свій продукт як «масло вершкове селянське», та повинна замінити цей напис на «масло вершкове бутербродне», адже масова частка жиру у ньому відповідає саме цій групі масла. Щодо зразка порівняння (рослинно-вершкової суміші ТМ «Вершкова долина») – показник масової частки жиру є нижчим від норм для вершкового масла селянського, але допустимим для спредів – від 50,0 до 85,0% згідно ДСТУ 4445:2005 «Спреди та суміші жирові. Загальні технічні умови» [6]. Крім того, фактичний вміст жиру спреду суперечить даним, вказаним на пакуванні – 72,5%.

Таблиця 3

Фізико-хімічні показники за ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове. Технічні умови»

Показник	Зразок						Норма за ДСТУ 4399:2005
	ТМ «Чутянка»	ТМ «Славія»	ТМ «Яготинське»	ТМ «Ферма»	ТМ «Білоцерківське»	ТМ «Вершкова долина»	
Масова частка жиру, %	71,65	73,60	72,58	72,98	72,50	69,50	72,50 – 79,90
Титрована кислотність жирової фази, °Т	1,20	1,80	2,50	2,50	2,50	2,20	Не більше 2,50
pH плазми	8,20	7,80	8,10	8,00	8,10	7,60	Не менше 6,25
Масова частка кухонної солі, %	0,0351	0,0585	0,0234	0,0234	0,0234	0,0234	Не більше 1,00

Показники титрованої кислотності жирової фази, pH плазми та масової частки кухонної солі усіх досліджуваних зразків вершкового масла знаходяться у допустимих межах.

Для виявлення фальсифікації або будь-яких інших технологічних порушень в роботі використовували методи люмінесценції та рефрактометрії.

Люмінесцентний метод дослідження масел і жирів заснований на властивості певного виду жиру люмінесціювати в потоці ультрафіолетових променів [7]. Натуральне вершкове масло (коров'яче) люмінесціює світло-жовтим кольором. Інші види жирів (немолочні) мають інтенсивно блакитне світіння. Результати дослідження представлено на рис. 2.

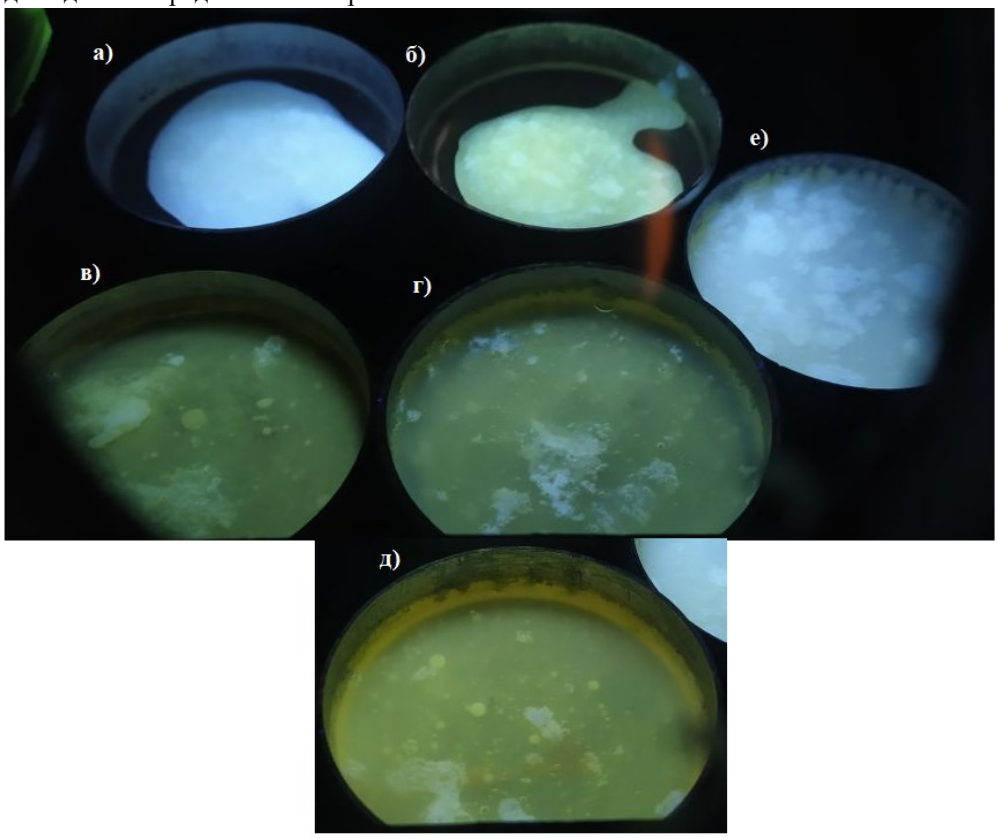


Рис. 2. Зразки вершкового масла у камері люміноскопу ЛПК-1:
а – ТМ «Чутянка», б – ТМ «Славія», в – ТМ «Яготинське», г – ТМ «Ферма»,
д – ТМ «Білоцерківське», е – ТМ «Вершкова долина»

Опромінення зразків масла люмінесцентними променями показало, що масло селянське солодковершкове ТМ «Чутянка» є продуктом фальсифікації та не може себе позиціонувати як масло селянське солодковершкове, оскільки воно випромінює блакитне світіння, аналогічно спреду ТМ «Вершкова долина».

Метод рефрактометрії також широко застосовується при виявленні фальсифікації або технологічних порушень виробництва харчової продукції. Коефіцієнт заломлення молочного жиру становить 1,453 – 1,455. Результати дослідження представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Дослідження показника заломлення зразків вершкового масла

Показник	Зразок					
	ТМ «Чутянка»	ТМ «Славія»	ТМ «Яготинське»	ТМ «Ферма»	ТМ «Білоцерківське»	ТМ «Вершкова долина»
Показник заломлення	1,457	1,455	1,453	1,453	1,454	1,459

Згідно отриманим даним (табл. 4), коефіцієнт заломлення зразків вершкового масла ТМ «Славія», ТМ «Яготинське», ТМ «Ферма», ТМ «Білоцерківське» відповідають коефіцієнту заломлення молочного жиру – 1,453 – 1,455. Показники заломлення зразка вершкового масла ТМ «Чутянка» та спреду ТМ «Вершкова долина» виходять за межі вказаного діапазону та свідчать про наявність домішок рослинних жирів.

Висновки

1. В результаті визначення правильності маркування згідно Закону України «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» встановлено, що маркування досліджуваних промислових зразків вершкового масла виконано правильно – необхідна інформація про харчовий продукт в повній мірі нанесена на пакування.

2. При визначенні органолептичних характеристик за бальною шкалою, запропонованою Ф.Ф. Гладким та ін., встановлено, що досліджувані зразки вершкового масла ТМ «Чутянка», ТМ «Славія», ТМ «Яготинське» та ТМ «Ферма» відносяться до вищого сорту. Зразок вершкового масла ТМ «Білоцерківське» через вади смаку й запаху, а також надмірну м'якість відноситься до 1 сорту.

3. При визначенні фізико-хімічних показників встановлено, що за показниками масової частки жиру, титрованої кислотності жирової фази, pH плазми та масової частки кухонної солі досліджувані зразки вершкового масла ТМ «Славія», ТМ «Яготинське», ТМ «Ферма» та ТМ «Білоцерківське» відповідають вимогам ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове. Технічні умови». Зразок вершкового масла ТМ «Чутянка» за показником масової частки жиру – 71,65% слід віднести до групи «масло вершкове бутербродне».

4. Опромінення зразків вершкового масла люмінесцентними променями показало, що зразок вершкового масла ТМ «Чутянка» через вміст рослинних жирів є продуктом фальсифікації, та не може себе позиціонувати як «масло селянське солодковершкове».

5. В результаті визначення коефіцієнтів заломлення зразків вершкового масла ТМ «Славія», ТМ «Яготинське», ТМ «Ферма» та ТМ «Білоцерківське» встановлено, що досліджувані зразки вершкового масла містять у своєму складі лише молочний жир. Коефіцієнти заломлення зразка вершкового масла ТМ «Чутянка» та зразка спреду ТМ «Вершкова долина» свідчать про наявність домішок рослинних жирів.

Література

1. ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове. Технічні умови».

2. Малигіна В. Д. Основи експертизи продовольчих товарів: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / В. Д. Малигіна, Л. Д. Титаренко, Л.В. Породіна, Г. О. Лихоніна, Н. Т. Лазарєва, О. Ю. Холодова. – К. Кондор, 2009. – 296 с.

3. Смоляр В.І. Харчова експертиза. Підручник. – К.: Здоров'я, 2005. – 448 с.

4. Закон України. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів / Відомості Верховної Ради (ВВР), №7. – 2019, ст. 41.

5. Сенсорний аналіз харчових продуктів: навч. посіб. / Ф.Ф. Гладкий, В.К. Тимченко, П.О. Некрасов, З.П. Федякіна, К.В. Куниця, С.М. Мольченко. – Харків: Видавництво та друкарня «Технологічний Центр», 2018. – 132 с.

6. ДСТУ 4445:2005 «Спреди та суміші жирові. Загальні технічні умови».

7. Базарнова, Ю.Г. Теоретические основы методов исследования пищевых продуктов / Ю.Г. Базарнова: Учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 136 с.

References

1. DSTU 4399:2005 «Maslo vershkove. Tekhnichni umovy».

2. Malyhina V. D. Osnovy ekspertyzy prodovolchykh tovariv: navch. posib. dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv / V. D. Malyhina, L. D. Tytarenko, L.V. Porodina, H. O. Lykhonina, N. T. Lazarieva, O. Yu. Kholodova. – K. Kondor, 2009. – 296 s

3. Smoliar V.I. Kharchova ekspertyza. Pidruchnyk. – K.: Zdorovia, 2005. – 448 s.

4. Zakon Ukrainy. Pro informatsiiu dlia spozhyvachiv shchodo kharchovykh produktiv / Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR), №7. – 2019, st. 41.

5. Sensornyi analiz kharchovykh produktiv: navch. posib. / F.F. Hladkyi, V.K. Tymchenko, P.O. Nekrasov, Z.P. Fediakina, K.V. Kunytsia, S.M. Molchenko. – Kharkiv: Vydavnytstvo ta drukarnia «Tekhnolohichnyi Tsentr», 2018. – 132 s.

6. DSTU 4445:2005 «Spredy ta sumishi zhyrovi. Zahalni tekhnichni umovy».

7. Bazarnova, Yu.H. Teoretycheskye osnovы metodov yssledovanyia pyshchevыkh produktov / Yu.H. Bazarnova: Ucheb. posobye. – SPb.: NYU YTMO; YKhyBT, 2014. – 136 s.

Надійшла / Paper received : 02.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-185-193
УДК 66.022.3-039.6

А.Я. ГАНЗЮК
Хмельницький національний університет
Л.М. МАСЛО
Хмельницький торговельно-економічний фаховий коледж Київського національного торговельно-економічного університету

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНТЕНСИФІКАТОРА НА СОРБЦІЮ ДИСПЕРСНИХ БАРВНИКІВ

Вивчено та описано термодинаміку процесу фарбування поліефірних текстильних матеріалів дисперсними барвниками в присутності аніліду саліцилової кислоти, проведено аналіз кінетичних кривих сорбцій, досліджено вплив інтенсифікаторів на дифузію дисперсних барвників в поліетилентерефталатний субстрат. Встановлено, що коефіцієнти дифузії збільшуються практично на порядок для усіх марок дисперсних барвників, зростає спорідненість барвників до поліефірного волокна і збільшується вибирання дисперсних барвників до 85 %.

Ключові слова: барвники, сорбція, поліефірний текстильний матеріал, текстильно- допоміжна речовина, поверхнево-активна речовина.

A.Y. HANZIUK
Khmelnytsky National University
L.M.MASLO
Khmelnytsky Trade and Economic Vocational College Kyiv National University of Trade and Economics

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT INTENSIFIER ON THE SORPTION OF DISPERSED DYES

For the successful development of the textile and light industry it is necessary to expand and qualitatively improve the raw material base due to the widespread use of chemical fibers. At the same time, special attention is paid to increasing the production of polyester fibers. The growing role of these fibers in the raw material balance of wool, silk, knitwear industries is primarily due to their valuable properties: high dimensional stability, compatibility with all types of natural and hydrated cellulose fibers, good strength, light and heat resistance. However, during their coloring there are significant difficulties associated with the peculiarities of their structure: high order of polyethylene terephthalate fibers, packing density of their macromolecules, hydrophobic nature of the fiber, lack of groups capable of interacting with ionic dyes, heterogeneity of textile yarn .

The work contains results of a complex investigation how properties and structure of polyester textiles colored with dispersed dyestuffs are changed at the presence of an intensificator – salicylic acid anylide. The obtained results are used to determine the mechanism of the intensificator's action during coloration. New technological modes were proposed for intensification of coloration process. These mode enable to eliminate the primary stage of textile processing – removal of grease and dirt by means of introduction of a stable composition of salicylic acid anylide and a mixture of surface active substances to a dye bath. The investigation of the effect intensifier on the sorption of dispersed dyes.

Key words: polyester textiles, coloration, structure, intensificators, surface active substances, crystallinity grade.

Для успішного розвитку текстильної і легкої промисловості необхідне розширене і якісне удосконалення сировинної бази за рахунок широкого використання хімічних волокон. При цьому, особлива увага приділяється збільшенню виробництва поліефірних волокон. Зростання ролі саме цих волокон в сировинному балансі вовняної, шовкової, трикотажної промисловостей обумовлені в першу чергу їх цінними властивостями: високою формостійкістю, сумісністю з всіма видами натуральних і гідратцелюлозних волокон, хорошою міцністю, світло- і термостійкістю. Однак, при їх кольорируванні виникають значні труднощі, пов'язані саме з особливостями їх структури: високою впорядкованістю поліетилентерефталатних волокон, щільністю упаковки їх макромолекул, гідрофобним характером волокна, відсутністю груп, здатних взаємодіяти з барвниками іонного типу, неоднорідністю властивостей текстильної нитки [1]. Потрібно сказати, що і до теперішнього часу оптимальної технології колорирування поліефірних волокон не розроблено, однак можна вказати два напрямки в яких проводяться ці дослідження:

- отримання волокон з порушеною регулярністю будови макромолекулярного ланцюга поліефіру, що забезпечує пониження кристалічності і щільності упаковки полімеру;
- введення в макромолекулу поліефіра груп аніонного і катіонного типу.

Однак, модифіковані волокна поки ще не находять широкого використання в текстильній промисловості. А тому, основним напрямком в розв'язанні цієї проблеми є введення в фарбувальну ванну інтенсифікаторів – речовин, які дають можливість фарбувати поліефірні волокна при температурах не вище 100 ºС. Це дає змогу не погіршувати фізико-хімічні властивості поліефірного волокна.

Актуальність теми. Колорирування поліефірних волокон дисперсними барвниками при температурах не вище 100 ºС в присутності інтенсифікаторів дає можливість уникнути використання дорогого обладнання, збільшити вибирання барвника, скоротити технологічний режим колорирування в кілька разів завдяки впровадженню швидкісних технологій. Для досягнення поставленої мети були намічені наступні задачі:

- дослідити вплив інтенсифікатора на дифузію дисперсних барвників в поліетилентерефталатний субстрат;
- провести комплексну оцінку змін властивостей, складу та структури поліефірних волокон на молекулярному, надмолекулярному та мікрорівнях;

- вивчити та описати термодинаміку процесу;

Об'єкт дослідження – композиції для колорирування поліефірних текстильних матеріалів дисперсними барвниками.

Предмет дослідження – процеси колорирування поліефірних текстильних матеріалів дисперсними барвниками.

Зростання ролі поліефірних волокон в сировинному балансі трикотажної промисловості обумовлене в першу чергу їх цінними властивостями: високою формостійкістю, сумісністю з іншими видами волокон, хорошою міцністю, світло- і термостійкістю. Поліетилентерефталат (ПЕТФ) – це полімер, що здатний існувати як в аморфному, так і в високо кристалічному станах. Середня молекулярна маса – 15000 – 20000, середня ступінь полімеризації – 160-180 [1-3].

Волокно характеризується більш компактною структурою, значною орієнтацією молекул вздовж осі, високим ступенем кристалічності і, відповідно, більш щільною упаковкою макромолекул. Воно має порівняно мале число активних центрів, характеризується чітко вираженими гідрофобними властивостями.

Сучасні методи аналізу показують існування кристалічних і аморфних зон в поліетилентерефталаті, однак ці результати недостатні для створення однозначної моделі його структури. Запропоновані такі моделі поліетилентерефталату: бахромчаті фібрили, складчаті ламелі, меандрова структура. За допомогою електронного мікроскопа було виявлено, що в поліефірному волокні основними елементами надмолекулярної структури є фібрили діаметром до 20 нм, які згруповані в більші фібрили діаметром до 100 нм. Вважається, що основні фібрили містять кристаліти, які по моделі Хеземана – Бонарта мають пластинчато - складчасту структуру, а по моделі Пехольда – меандрову. Поліефірне волокно характеризується як міцне, пружне, еластичне; допустима робоча температура експлуатації 120 – 130 ºС.

Найважливіші фізичні властивості поліетилентерефталату представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізичні властивості поліетилентерефталату

Фізичний показник	Значення показника
Поглинання вологи при 20 °С та φ=65%, %	0,4
Густина при 25 °С, г/см ³	1,38
Температура плавлення, ºС	260
Температура липкості, ºС	230-240
Відновна теплоємність при 20 °С, $\frac{кДж}{кг \cdot K^{\circ}}$	0,083
Коефіцієнт об'ємного розширення, Т < 60 ºС В інтервалі температур 90...190 °С	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$ $3{,}7 \cdot 10^{-4}$

Як і інші текстильні волокна поліефірне волокно характеризується низькою міцністю в поперечному напрямку внаслідок його анізотропної структури. Поліефірне волокно термопластичне, внаслідок чого його міцністні характеристики знижуються, а розривне подовження зростає з підвищенням температури. По стійкості до витирання поліефірні волокна поступаються тільки поліамідним. Однією з найважливіших властивостей поліефірного волокна є здатність зберігати форму після теплової обробки при високих температурах. Поліефірний текстильний матеріал є хорошим ізолятором, характеризується дуже великим напівперіодом стікання заряду. В таблиці 1.3 надані напівперіоди стікання заряду для різних типів поліефірних волокон при 21 °С і φ = 65%. Поліефірні волокна – це продукт взаємодії терефталевої кислоти і гліколю, отримують шляхом прядіння їх з розплаву. Після поліамідних і поліакрилонітрильних поліефірні волокна є найбільш розповсюдженими синтетичними волокнами. Завдяки високій стійкості до дії світла вони придатні для виготовлення декоративних тканин, особливо гардин і портьєр; суміш поліефірних волокон з бавовною знайшла широке використання при виробництві тканин для сорочок. Біля 1% вироблених в світі поліефірних волокон [4] випускається в пофарбованому виді, головним чином в чорний колір. З цією метою в процесі синтезу поліетилентерефталату вводять дрібнодисперсне вугілля в вигляді суспензії в етиленгліколі. Фарбування в масі в інші кольори може здійснюватись введенням термостійких пігментів або органічних розчинників. Фірма "Циммер" отримала патент на метод виготовлення концентрату барвника в полімері шляхом механічного розтирання їх суміші з одночасним розплавленням. За іншим методом в розплав поліефіру вводять суміш барвника з поліпропіленом, поліетиленом, поліетилгліколем або трифосфатом [5]. По методу фірми "Імперіел Кемікел Індастріз" в прядильну головку точно дозують гранули барвника зі зв'язуючим – диглікольтерефталатом. Цей метод дає можливість змінити асортимент без суттєвої витрати продукту, але потребує спеціального методу приготування гранульованих барвників. Мають місце методи, де описано шнек для розплавлення нефарбованого поліефіру з введенням в нього гранул, які відрізняються від зафарбованого моноволокна. По технології фірми "Інвента" (Швейцарія) пігменти додають в окремий потік поліефіру, який потім змішують з головним потоком

поліефіру на устаткуванні безперервного процесу [6]. Відомий метод отримання зафарбованих волокон шляхом введення при синтезі поліетилентерефталата барвників, що містять групи, активні в процесі етерифікації [7]. Серед прогресивних методів фарбування поліефірних текстильних матеріалів найбільш розповсюдженим є термозольний метод [8-9]. Фарбують дисперсними барвниками, в фарбувальний розчин вводять 2-20 г/л капролактаму, що дозволяє знизити робочу температуру або значно скоротити тривалість процесу. Рядом авторів [10-16] розроблено рецептуру і режим фарбування поліефірного волокна кубозолями за періодичним способом для отримання середніх по інтенсивності забарвлень при температурі, що не перевищує 100 ºС. Спосіб "Вапокол" [17-19] розроблений в Англії фірмою "Ай-Сі-Ай", який базується на спроможності деяких розчинників викликати набухання синтетичних волокон. Дає хороші результати при фарбуванні тканин, виготовлених з філоментарних поліефірних волокон. Спосіб фарбування із середовища органічних розчинників [20] поки що не знайшов широкого застосування у промисловості із-за складності регенерації розчинника та ліквідації скидів у стічні води. З літературних джерел відомо, що [21-23] фарбування лавсану в середовищі водного розчину аміаку з сумішшю амоній хлориду поряд з хорошими якостями забарвлення надає волокну підвищеної стійкості до розривного навантаження. Матецьким В.А і Садовим Ф.І. вивчено метод фарбування синтетичних волокон з використанням коацерватних систем, що базується на використанні емульсій в фарбувальній ванні, які утворюються за допомогою спеціально підібраних допоміжних препаратів, наприклад, моно- та диетаноламідів [1].Рядом авторів виявлено, що використання електричного струму частотою 400 Гц і силою 1,5А дає можливість підвищити сорбцію дисперсних барвників поліефірним субстратом в 10 раз при температурі 100 ºС. При цьому волокно прокрашується по всьому поперечному перерізу протягом 15 хв. [24-30]. Для інтенсифікації процесу фарбування лавсану дисперсними барвниками можна використовувати фурфурол концентрацією в межах 2-30 г/л. Його використання не приводить до зниження показників міцності тканини. Запропоновано механізм впливу сечовини як інтенсифікатора на процес фіксації дисперсних барвників термопластичними волокнистими матеріалами в умовах сполученої обробки СВЧ - випромінюванням та насиченою водяною парою [27-29]. Попередня обробка розчинами лугів поліефірного трикотажного полотна підвищує інтенсивність його забарвлення дисперсними барвниками – похідними антрахінону, що обумовлено в першу чергу збільшенням сорбції дисперсного барвника [30]. Авторами [31-34] запропонований спосіб одночасного намагнічування фарбувального розчину і текстильного матеріалу в процесі просочування для інтенсифікації термофіксаційного фарбування дисперсними барвниками. Стійке підвищення забарвленості тканин забезпечується в інтервалі напруги магнітних полів 120-240 кА/м. Авторами [25] досліджено використання електроактивованої води для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів фарбування та опорядження текстильних матеріалів, що дає змогу не тільки прискорити процес, а й зменшити концентрацію хімічних реагентів, досягнувши при цьому бажаних ефектів. Спосіб фарбування з інтенсифікатором – найбільш ранній і простий, але в нього є ряд недоліків. Інтенсифікатори понижують стійкість забарвлення до фізико-хімічних впливів, особливо до світла і погоди. Для фарбування з інтенсифікатором, як правило, потрібна кропітка робота з метою його підбору. Однак, правильно підібраний інтенсифікатор дозволяє отримати високоякісні показники фарбування на поліефірних волокнах [36-40]. Традиційні методи фарбування не придатні для поліефірних волокон через особливостей його структури. Тому вирішення цієї проблеми здійснювалось в двох напрямках: перший – використання допоміжних хімічних речовин і другий – проведення процесу фарбування при температурах вище 100 ºС. Треба відмітити, що у більшості робіт по дослідженню дії інтенсифікатора встановлено, що він зміщує рівноважний розподіл барвника між фарбувальним розчином і волокном в сторону волокна. Однак причини, які визивають це зміщення, не встановлені. Більшість дослідників притримуються думки, що дія інтенсифікатора швидше направлена на волокно, ніж на фарбувальну ванну. З іншої сторони, дія інтенсифікатора на структуру волокна трактується як зміна кристалічності полімера в сторону збільшення його аморфності. Механізм дії інтенсифікатора, сформульований в роботі [22], пропонує, що він, вступаючи в спеціальну взаємодію з волокном, викликає послаблення міжмолекулярних сил взаємодії в волокні, що веде до набухання, збільшення вільного об'єму волокна і появі мікро тріщин на його поверхні. Саме туди і проникають молекули води, виконуючи функцію своєрідного клину, який викликає ще більше набухання волокна, полегшуючи тим самим дифузію молекул барвника в середину волокнистого матеріалу. Однак, наводяться дані [13-15], що хлорпохідні бензолу володіють достатньо високим ефектом інтенсифікації, але при цьому набухання поліетилентерефталат не викликають, а похідні фенолу здатні викликати необмежене набухання поліефірних волокон майже до розчинення, і при цьому мають низький ефект інтенсифікації фарбування.В роботі А.П. Мориганова і Б.Н. Мельнікова встановлено, що найбільш ефективно фіксація з поліефірною тканиною протікає при температурі парів азеотропної суміші – 140 ºС [22]. Треба відмітити, що в роботах [23, 30] вивчено вплив хлоридів, ацетатів і сульфатів деяких металів і амонію в водні розчини на нафарбованість поліефірного волокна азо- і антрахіноновими дисперсними барвниками в умовах періодичного фарбування. При цьому, направлена дія хлоридів на адсорбцію поліефіром дисперсних барвників визначаються їх молекулярною будовою. З літературних даних відомо, що попередня лужна обробка поліефірного трикотажного полотна підвищує інтенсивність забарвлення дисперсними барвниками – похідними антрахінон, що обумовлює, в першу чергу, зростання сорбції дисперсного барвника за рахунок лужної обробки. При цьому вона не впливає на стійкість кольору матеріалу до прання і тертя [30]. На основі ряду досліджень процесів періодичного фарбування поліефірних текстильних матеріалів в ІХНР РАН,

розроблений комплексний препарат «Івлан-2», використання якого дає можливість уникнути використання в фарбувальній ванні для високотемпературного способу фарбування “Рапід колор” інтенсифікатор, а також диспергаторів барвника і олігомерів. Результати досліджень доводять, що введення в фарбувальну ванну препарату «Івлан-2», забезпечує досягнення кінетики фарбування, значень коефіцієнтів дифузії, констант сорбції і десорбції та ефектів міграції, близьких до оптимальних і не гірше, ніж використання імпортних текстильно-допоміжних речовин.

У якості інтенсифікаторів фарбування поліефірних волокон дисперсними барвниками вибрані 12 органічних речовин різної хімічної будови. Вплив виду інтенсифікаторів на сорбцію дисперсних барвників поліефірним волокном в періодичному способі фарбування досліджували для барвника дисперсного червоного 2С пе. Концентрація інтенсифікаторів в фарбувальній ванні складала 5 г/л. Умови процесу фарбування: вміст барвника в ванні – 2,5%; температура – 98 ºС; тривалість – 60 хв. Результати дослідження впливу виду інтенсифікаторів на сорбцію дисперсного червоного 2С пе поліефірним волокном в періодичному способі фарбування представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Вплив виду інтенсифікаторів на сорбцію дисперсного червоного 2С пе поліефірним волокном

Інтенсифікатор	$D_п/c_п$	$D_{ост}/c_{ост}$	$c_в$, г/кг
П-оксидифеніламін	5,8	0,09	17,92
П-бензолтриазол	5,8	4,45	8,38
Диметилгліоксим	5,8	4,48	8,55
Ацетанілід	5,8	4,99	9,05
4,6-динітро, о-крезол	5,8	4,50	9,08
Аспарагінова кислота	5,8	4,50	9,13
Поліфеніленоксид	5,8	4,51	10,00
1-хлор, 2-нафтол	5,8	0,52	17,80
Ірамін	5,8	4,51	9,50
Дифеніл	5,8	4,34	12,55
Анілід саліцилової к-ти	5,8	1,41	17,45
Бензилацетат	5,8	3,66	15,20

Найкраща сорбція дисперсного червоного 2С пе поліефірним волокном спостерігається для наступних інтенсифікаторів: п-оксидифеніламіну, 1-хлор, 2-нафтолу, аніліду саліцилової кислоти і бензилацетату. При використанні в якості інтенсифікатора п-оксидифеніламіну спостерігається зміна кольору пофарбованої тканини, а тому у подальших дослідженнях ця речовина не використовувалась.

Результати досліджень впливу умов процесу фарбування на сорбцію дисперсних барвників поліефірним волокном в присутності інтенсифікатора аніліду саліцилової кислоти представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Вплив умов процесу фарбування на сорбцію барвників поліефірним волокном в присутності інтенсифікатора аніліду саліцилової кислоти

Барвник	Концентрація барвника у волокні, г/кг			
	Температура 98 ºС		Температура 130 ºС	
	без інтенсифікатора	з інтенсифікатором	без інтенсифікатора	з інтенсифікатором
Дисперсний жовтий 4З пе	12,76	13,30	16,90	18,79
Дисперсний червоний 2С пе	8,65	17,45	22,4	24.56
Дисперсний рубіновий пе	21,32	23,50	21,50	23,35
Дисперсний жовто-коричневий 2Ж пе	15,84	16,96	24,30	26,67
Дисперсний яскраво-червоний 2Ж пе	14,52	15,2	16,5	19,11
Дисперсний синій З пе	13,20	13,90	15,50	17,77

Застосування аніліду саліцилової кислоти в якості інтенсифікатора процесу фарбування поліефірного волокна дисперсними барвниками є ефективним засобом інтенсифікації процесу. Як показали дослідження, працювати з шістьма марками барвників складно. Тому для подальших досліджень обрано дисперсні барвники з різною характерною хімічною будовою: а) дисперсний червоний 2С пе – клас антрахінонових; б) дисперсний жовто-коричневий 2Ж – клас азобарвників; в) дисперсний жовтий 4З – клас перінонових барвників. Проведено дослідження процесів сорбції для цих барвників в присутності ряду інтенсифікаторів. Концентрація інтенсифікаторів в ванні складала 5/л. Умови процесу фарбування: вміст барвника в ванні – 2,5%; температура – 98 ºС; тривалість – 60 хв. Результати досліджень представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Вплив виду інтенсифікатора на сорбцію дисперсних барвників

Барвник	Концентрація барвника у волокні, г/кг			Середнє квадр. відхилення σ
	інтенсифікатор ХН	інтенсифікатор АСК	інтенсифікатор БА	
Дисперсний червоний 2С пе	17,20	17,45	14,36	0,34
Дисперсний жовто-коричневий 2Ж пе	13,20	13,20	12,15	0,28
Дисперсний жовтий 4З пе	16,82	16,96	16,20	0,31

Вибирання дисперсних барвників визначали на поліефірній тканині при температурах 98 і 130 ºС протягом постійного часу фарбування (60 хв.). Підготовку і фарбування тканини проводили згідно режимам, які наведені в методичній частині. Інтенсифікатором фарбування служив анілід саліцилової кислоти в концентрації 5 г/л. Фарбування при температурі 98 ºС проводили на лабораторній установці. Фарбування при температурі 130 ºС (високотемпературний спосіб фарбування) проводили на фарбувальній машині «ISAL AG 4006» DFSEI/SCHWEIS, яка працює під підвищеним тиском. Вибирання барвників визначали по концентрації барвника в залишкових ваннах, які були розбавлені диметилформамідом.

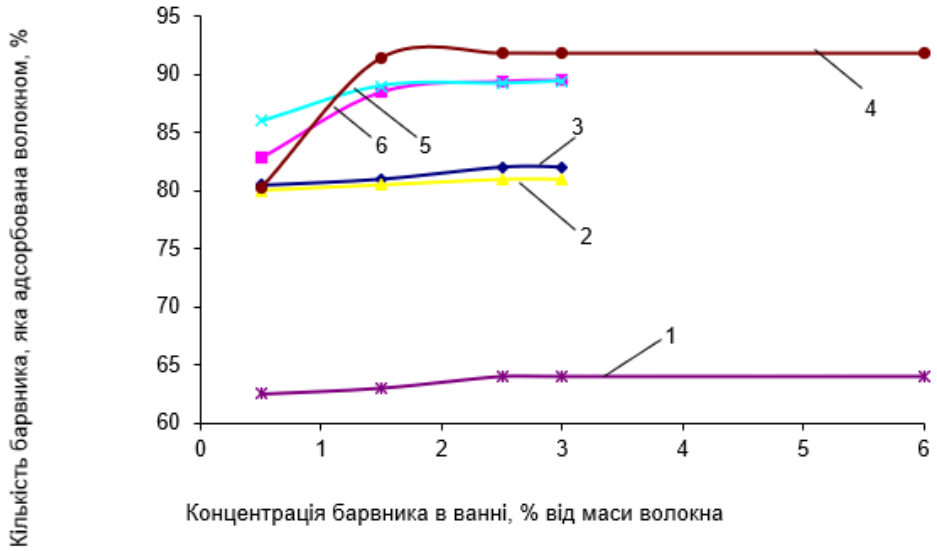


Рис.1. – Криві вибирання дисперсних барвників при температурі 98 ºС
1, 2, 3 – для дисперсних: жовтого 4З пе, жовто-коричневого 2Ж пе і червоного 2С пе без інтенсифікатора відповідно; 4, 5, 6 – з інтенсифікатором анілідом саліцилової кислоти (5г/л)

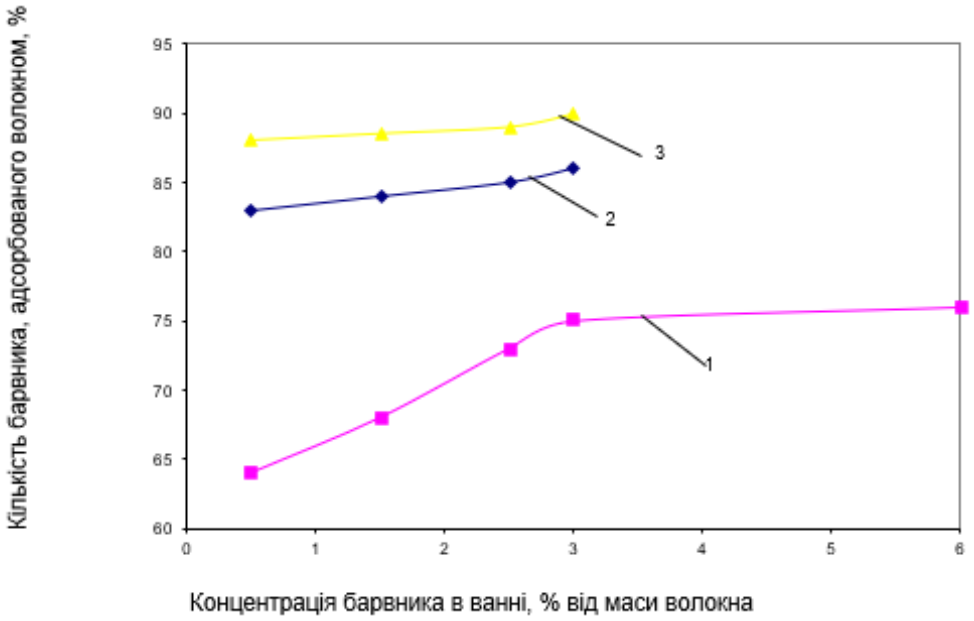


Рис. 2.– Криві вибирання дисперсних барвників при температурі 130 ºС
1, 2, 3 – для дисперсних: жовтого 4З пе, червоного 2С пе і жовто-коричневого 2Ж пе без інтенсифікатора відповідно

Таким чином, досліджено вплив інтенсифікаторів та температури на сорбцію дисперсних барвників поліефірним волокном. Встановлено доцільність використання в подальших дослідженнях інтенсифікаторів, що мають у своєму складі бензольні кільця: бензилацетат, 1-хлор, 2-нафтол, анілід саліцилової кислоти. На основі отриманих результатів дослідження впливу інтенсифікаторів на процес сорбції дисперсних барвників встановлено, що найбільш ефективним є анілід саліцилової кислоти.

Сорбційні властивості системи волокно-барвник найбільш точно можливо оцінити за допомогою термодинамічних характеристик. Фарбувальна ванна представляє собою термодинамічну систему, яка під дією підведення енергії у вигляді тепла може переходити від одного стану до іншого. Причиною сорбції барвників волокном є більш високе значення хімічного потенціалу барвника в розчині - μ_p в порівнянні з його потенціалом в волокні - $\mu_в$. Сорбція протікає до того часу, коли не наступить рівність потенціалів $\mu_p = \mu_в$. При розрахунку спорідненості ми враховували ефективний об'єм поліефірного волокна - об'єм, який доступний для сорбції барвника. Результати розрахунків спорідненості дисперсних барвників до поліефірного волокна в присутності інтенсифікатора – аніліду саліцилової кислоти (5г/л) представлені в табл. 3.4. Як видно з табл. 3.4, присутність інтенсифікатора в фарбувальній ванні збільшує спорідненість барвників до волокна і це дає можливість зсунути рівновагу в сторону переходу барвника в волокно.

Таблиця 5

Спорідненість дисперсних барвників до поліефірного волокна в присутності інтенсифікатора – аніліду саліцилової кислоти (5г/л)

Барвник	Без інтенсифікатора		$-\Delta\mu^\circ$, $\frac{ммоль}{л}$	З інтенсифікатором		$-\Delta\mu^\circ$, $\frac{ммоль}{л}$
	$c_{р,\infty}\cdot 10^{-10}$, $ммоль/кг$	$c_{в,\infty}\cdot 10^{-4}$, $ммоль/кг$		$c_{р,\infty}\cdot 10^{-10}$, $ммоль/кг$	$c_{в,\infty}\cdot 10^{-4}$, $ммоль/кг$	
Дисперсний червоний 2С пе	1,176	0,345	48,500	1,825	0,192	56,600
Дисперсний жовний 4З пе	0,620	0,533	44,730	0,930	0,412	49,520
Дисперсний жовто-коричн. 2Ж пе	1,123	0,127	42,400	1,322	0,116	46,300

Таким чином, вивчено та описано термодинаміку процесу, суть якої в наступному: присутність інтенсифікатора в фарбувальній ванні збільшує спорідненість барвників до волокна і це дає можливість зсунути рівновагу процесу в сторону переходу барвника у волокно.

Знання термодинаміки фарбувальної системи дає можливість оцінити механізм взаємодії барвника з волокном чи ТДР. Знання кінетики дає можливість визначити швидкість процесу, зробити розрахунки, які мають практичну цінність, наприклад, розрахувати продуктивність фарбувального апарату.

Нами проведені експериментальні дослідження і побудовані кінетичні криві для дисперсних барвників різної хімічної будови. У якості інтенсифікатора застосовували анілід саліцилової кислоти в концентрації 5 г/л. Умови фарбування: концентрація барвника – 2,5% від маси волокна, температура – 98 ºС; час фарбування – 60 в. Кінетичні криві фарбування представлені на рисунку 3.

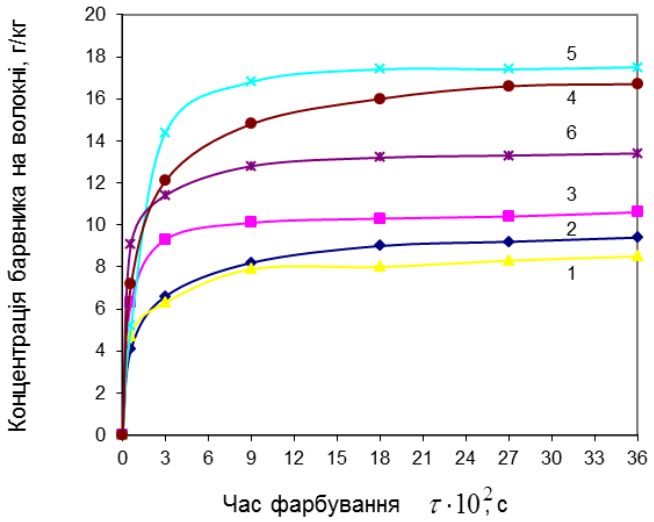


Рис. 3. – Кінетичні криві сорбції дисперсних барвників поліефірним волокном
1, 2, 3 – для барвників: дисперсного жовто-коричневого 2Ж пе, червоного 2С пе, жовтого 4З пе відповідно без інтенсифікатора; 4, 5, 6 – з інтенсифікатором анілідом саліцилової кислоти (5 г/л)

Аналіз кінетичних кривих сорбції показує, що інтенсифікатор анілід саліцилової кислоти різко збільшує рівноважне вибирання дисперсних барвників поліефірним волокном, особливо це помітно для дисперсного червоного 2С пе. Якщо розрахувати час половинного фарбування, то для дисперсного червоного 2С пе він зростає в присутності інтенсифікатора майже втричі. Збільшення часу половинного фарбування приводить до більш повного дофарбовування поліефірного волокна і це дає можливість уникнути такого явища, як кільцеве дофарбовування. Таким чином, кінетичні криві сорбції дисперсних барвників поліефірним волокном ще раз показують ефективність застосування в якості інтенсифікатора аніліду саліцилової кислоти.

Висновки

Вивчено та описано термодинаміку процесу фарбування поліефірних текстильних матеріалів дисперсними барвниками в присутності аніліду саліцилової кислоти, проведено аналіз кінетичних кривих сорбцій, досліджено вплив інтенсифікаторів на дифузію дисперсних барвників в поліетилентерефталатний субстрат. Встановлено, що коефіцієнти дифузії збільшуються практично на порядок для усіх марок дисперсних барвників, зростає спорідненість барвників до поліефірного волокна і збільшується вибирання дисперсних барвників до 85 %. Досліджено граничну пофарбованість поліефірного волокна в присутності інтенсифікаторів і без них. Виявлено, що найбільший ступінь заповнення має барвник великої молекулярної маси, з великою кількістю замісників і довжиною ланцюга в хімічній будові, запропоновано математичні лінійні моделі залежностей граничної пофарбованості поліефірного волокна від температури. На основі комплексної оцінки змін властивостей, складу та структури поліефірних волокон на молекулярному, надмолекулярному та мікрорівнях, запропоновано ймовірний механізм дії інтенсифікатора, згідно якого молекули аніліду саліцилової кислоти розпушують надмолекулярну структуру поліефірного волокна за рахунок його набухання та сприяють збільшенню розчинності дисперсних барвників.

Література

1. Забашта В. Н. Основы интенсификации крашения полиэфирных волокон / В. Н. Забашта. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 136 с.

2. Кричевский Г. Е. Химическая технология текстильных материалов: Учебник для вузов / Г.Е. Кричевский, М. В. Корчагин, А. В. Сенахов. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 640 с.

3. Кричевский Т. Е. Текстильная химия. Из XX в XXI век / Т. Е. Кричевский // Текстильная промышленность. – 2000. – №4. – с. 14-16.

4. Городничая Т. Ю. Исследование интенсифицирующего воздействия органических спиртов и четвертичных аммониевых соединений на процесс щелочного гидролиза полиэтилентерефталатных волокон / Т. Ю. Городничая, И. Ю. Царевская, Л. Г. Ковтун, Г. Е. Кричевский // РЖХ. – 1990. – №2. – с. 65.

5. Gunninghom Alan D. The controlled coloration ocpproach for right dirst time dyeing of polyester / Gunninghom Alan D. // Text Chem. and Color. – 1997. – Vol. 29, №1. – p. 23 - 25.

6. Айзенштейн Э. М. Химические волокна. Перспективы производства и применения / Э. М. Айзенштейн // Текстильная химия. – 2000. - №2 (18). Специальный выпуск. – с. 22-28.

7. Мельников Б. Н. Теория и практика высокоскоростной фиксации красителей на текстильных материалах / Б. Н. Мельников, А. П. Морыганов, Ю. А. Калинников. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 207 с.

8. А.с. 1719501 СССР, МКИ Д 0G Р 5/04. Способ крашения текстильного материала / Падохин В.А., Морыганов А.П., Семенов В.М., Смирнова О.К., Константинов О.И. (СССР). - № 4792457/05; Заявлено 28.12.82; Опубл. 15.03.92. Бюл. №10. – 12 с.

9. Давидзон М. И. Интенсификация массообменных процессов при крашении пряжи/ М. И. Давидзон // Текстильная промышленность. – 1987. – №12. – с. 15-18.

10. Шарнина Л. В. Применение дисперсных полиэфирных красителей для однотонного крашения смешанных тканей / Л. В. Шарнина, И. Б. Блиничева // РЖХ. – 1987. – №11. – с. 75.

11. Мельников Б. Н. Современное состояние и перспективы развития технологии крашения текстильных материалов / Б. Н. Мельников, М. Н. Кириллова, А. П. Морыганов. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 233 с.

12. Мельников Б. Н. Теория и практика высокоскоростной фиксации красителей на текстильных материалах / Б. Н. Мельников, А. П. Морыганов, Ю. А. Калинников. – М. : Легпромиздат, 1989. – 209 с.

13. Xerography: a novel technigue for textile printing // Text. Technol. Dig. – 1996. – Vol. 53, №10. – P. 64.

14. Technicel revolutions in textile printing // Text. Technol. Dig. – 1996. –Vol. 53, №6. – Pt. 1. – P. 56.

15. Смирнова О.К. Диффузия дисперсных красителей в полиэтилентерефталатный материал в среде органических растворителей / О. К. Смирнова, Н. С. Дымникова // РЖХ. – 1986. – №12. – с. 54.

16. Забродин С. А. Влияние электрического тока на свойства получаемых окрасок при крашении лавсана / С. А. Забродин, В. Е. Мясоедов // Известия вузов. Технология текстил. пром-сти. – 1992. – №2 (206) – с. 57-60.

17. Забродин С. А. Влияние электрического тока на свойства получаемых окрасок при крашении лавсана / С. А. Забродин, В. Е. Мясоедов // РЖХ. – 1991. – №9. – с. 58.

18. Городничая Т.Ю. Интенсификация процессов окрашивания дисперсными красителями трикотажных полотен из полиэфирных волокон : Дис…канд. техн. наук: 05.19.03. – М., 1989. – 186 с.

19. А.с. 1636491, МКИ Д О6 М 15/643, 13/144. Способ для обработки текстильных материалов / П. А. Глубиш, Э. М. Рожко, Н. И. Степанчук, Ф. Б. Линецкая, Л. Р. Катанистая. – опубл. 23.03.91.

20. Кричевский Г. Е. Теория и практика подготовки текстильных материалов / Г. Е. Кричевский, А. Никитков. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 33 с.

21. Побединский В. С. Роль мочевины в ускорении процесса запарной микроволновой фиксации дисперсных красителей / В. С. Побединский, Г. А. Колохина, А. В. Гарелин // РЖХ. –1990. – №1. – с. 54.

22. Коновалова М. В. Влияние щелочной обработки полиэфирных текстильных материалов на их колористические характеристики при последующем крашении дисперсными красителями/ М. В. Коновалова, И. В. Гличева, Л. Т. Ковтун // РЖХ. – 1996. – №11. – с. 58-59.

23. Анохин В. В. Химия и физико-химия полимеров / В. В. Анохин. – К.: Вища школа, 1987. – 389 с.

24. Тарутина Л. И. Спектральный анализ полимеров / Л. И. Тарутина, Ф. О. Позднякова. – Л. : Химия, 1986. – 248 с.

25. Ганзюк А.Я. Інтенсифікація процесу колорирування поліефірних текстильних матеріалів дисперсними барвниками: дис…канд. техн. наук: 05.19.03 / Ганзюк Алла Ярославівна. – Х. 2004. – 171 с.

26. Органические синтетические красители: Каталог. – М.: НИОПИК, 1984 – 67 с.

27. Сарибеков Г. С. Справочник по отделке текстильных материалов / Г. С. Сарибеков. – К.: Техника, 1984. –350 с.

28. Лабораторный практикум по химической технологии текстильных материалов: Учебное пособие для вузов / Т. С. Новорадовская и др.; под ред. Г. Е. Кричевского. – М. : Легпромбытиздат, 1994. – 399 с.

29. Методы исследования в текстильной химии: Справочник / Под ред. Г. Е. Кричевского. – М.: Международная текстильная академия НПО “Текстильпрогресс” инженерной академии России, Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности, 1993. – 402 с.

30. Физико-химические методы анализа. Практическое руководство: Учебное пособие для вузов / В. Б. Алесковский, В. В. Бардин, Н. И. Булатов ; под ред. Алесковского В.Б. – Л. : Химия, 1988. – 376 с.

31. Ахназарова С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1998. – 320 с.

32. Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: Справочное пособие / Л. З. Румшиский. – М.: Наука, 1981. – 192 с.

33. Планирование эксперимента в технике / В. И. Барабащук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко; под ред. Б.П. Креденцера. – К. : Техніка, 1984 – 200 с.

34. Венецкий И. Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: справочник / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1989. – 448 с.

35. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 116 с.

36. Ганзюк А. Я. Вплив інтенсифікаторів на дифузію дисперсних барвників в поліетилентерефталатний матеріал / А. Я. Ганзюк, Г. С. Сарібеков, О. І. Кулаков // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2003. – №1(7). – с. 34 – 36.

37. Аскадский А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А. А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 250 с.

38. Луцык Р. В. Тепломассообмен при обработке текстильных материалов / Р. В. Луцык, Э. С. Малкин, И. И. Абаржи. – Киев: Наук. думка, 1993. – 344 с.

39. Ганзюк А.Я. Вплив різних факторів на граничну нафарбованість поліефірного волокна / Ганзюк А.Я., Кулаков О.І. // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2004. – №1. – с.107–111.

Referense

1. Zabashta V. N. Osnovы yntensyfykatsyy krashenyia polyэfyrnыkh volokon / V. N. Zabashta. – L.: Yzd-vo Lenynhr. un-ta, 1981. – 136 s.

2.Krychevskyi H. E. Khymycheskaia tekhnolohyia tekstylnыkh materyalov: Uchebnyk dlia vuzov / H.E. Krychevskyi, M. V. Korchahyn, A. V. Senakhov. – M.: Lehprombытyzdat, 1985. – 640 s.

3.Krychevskyi T. E. Tekstylnaia khymyia. Yz KhKh v KhKhI vek / T. E. Krychevskyi // Tekstylnaia promыshlennost. – 2000. – №4. – s. 14-16.

4.Horodnychaia T. Yu. Yssledovanye yntensyfytsyruiushcheho vozdeistvyia orhanycheskykh spyrtov y chetvertychnыkh ammonyevыkh soedynenyi na protsess shchelochnoho hydrolyza polyэtylentereftalatnыkh volokon / T. Yu. Horodnychaia, Y. Yu. Tsarevskaia, L. H. Kovtun, H. E. Krychevskyi // RZhKh. – 1990. – №2. – s. 65.

5.Gunninghom Alan D. The controlled coloration ocppoach for right dirst time dyeing of polyester / Gunninghom Alan D. // Text Chem. and Color. – 1997. – Vol. 29, №1. – r. 23 - 25.

6.Aizenshtein Э. M. Khymycheskye volokna. Perspektyvы proyzvodstva y prymenenyia / Э. M. Aizenshtein // Tekstylnaia khymyia. – 2000. - №2 (18). Spetsyalnыi vыpusk. – s. 22-28.

7.Melnykov B. N. Teoryia y praktyka vыsokoskorostnoi fyksatsyy krasytelei na tekstylnыkh materyalakh / B. N. Melnykov, A. P. Morыhanov, Yu. A. Kalynnykov. – M.: Lehprombытyzdat, 1989. – 207 s.

8.A.s. 1719501 SSSR, MKY D 0G R 5/04. Sposob krashenyia tekstylnoho materyala / Padokhyn V.A., Morыhanov A.P., Semenov V.M., Smyrnova O.K., Konstantynov O.Y. (SSSR). - № 4792457/05; Zaiavleno 28.12.82; Opubl. 15.03.92. Biul. №10. – 12 s.

9.Davydzon M. Y. Yntensyfykatsyia massoobmennыkh protsessov pry krashenyy priazhy/ M. Y. Davydzon // Tekstylnaia promыshlennost. – 1987. – №12. – s. 15-18.

10.Sharnyna L. V. Prymenenye dyspersnыkh polyэfyrnыkh krasytelei dlia odnotonnoho krashenyia smeshannыkh tkanei / L. V. Sharnyna, Y. B. Blynycheva // RZhKh. – 1987. – №11. – s. 75.

11.Melnykov B. N. Sovremennoe sostoianye y perspektyvы razvytyia tekhnolohyy krashenyia tekstylnыkh materyalov / B. N. Melnykov, M. N. Kyryllova, A. P. Morыhanov. – M. : Lehkaia y pyshchevaia promыshlennost, 1983. – 233 s.

12.Melnykov B. N. Teoryia y praktyka vыsokoskorostnoi fyksatsyy krasytelei na tekstylnыkh materyalakh / B. N. Melnykov, A. P. Morыhanov, Yu. A. Kalynnykov. – M. : Lehpromyzdat, 1989. – 209 s.

13.Xerography: a novel technigue for textile printing // Text. Technol. Dig. – 1996. – Vol. 53, №10. – R. 64.

14.Technicel revolutions in textile printing // Text. Technol. Dig. – 1996. –Vol. 53, №6. – Pt. 1. – P. 56.

15.Smyrnova O.K. Dyffuzyia dyspersnыkh krasytelei v polyэtylentereftalatnыi materyal v srede orhanycheskykh rastvorytelei / O. K. Smyrnova, N. S. Dыmnykova // RZhKh. – 1986. – №12. – s. 54.

16.Zabrodyn S. A. Vlyianye эlektrycheskoho toka na svoistva poluchaemыkh okrasok pry krashenyy lavsana / S. A. Zabrodyn, V. E. Miasoedov // Yzvestyia vuzov. Tekhnolohyia tekstyl. prom-sty. – 1992. – №2 (206) – s. 57-60.

17.Zabrodyn S. A. Vlyianye эlektrycheskoho toka na svoistva poluchaemыkh okrasok pry krashenyy lavsana / S. A. Zabrodyn, V. E. Miasoedov // RZhKh. – 1991. – №9. – s. 58.

18.Horodnychaia T.Iu. Yntensyfykatsyia protsessov okrashyvanyia dyspersnыmy krasyteliamy trykotazhnыkh poloten yz polyэfyrnыkh volokon : Dys…kand. tekhn. nauk: 05.19.03. – M., 1989. – 186 s.

19.A.s. 1636491, MKY D O6 M 15/643, 13/144. Sposob dlia obrabotky tekstylnыkh materyalov / P. A. Hlubysh, Э. M. Rozhko, N. Y. Stepanchuk, F. B. Lynetskaia, L. R. Katanystaia. – opubl. 23.03.91.

20.Krychevskyi H. E. Teoryia y praktyka podhotovky tekstylnыkh materyalov / H. E. Krychevskyi, A. Nykytkov. – M.: Lehprombыtyzdat, 1989. – 33 s.

21.Pobedynskyi V. S. Rol mochevynы v uskorenyy protsessa zaparnoi mykrovolnovoi fyksatsyy dyspersnыkh krasytelei / V. S. Pobedynskyi, H. A. Kolokhyna, A. V. Harelyn // RZhKh. –1990. – №1. – s. 54.

22.Konovalova M. V. Vlyianye shchelochnoi obrabotky polyэfyrnыkh tekstylnыkh materyalov na ykh kolorystycheskye kharakterystyky pry posleduiushchem krashenyy dyspersnыmy krasyteliamy/ M. V. Konovalova, Y. V. Hlycheva, L. T. Kovtun // RZhKh. – 1996. – №11. – s. 58-59.

23.Anokhyn V. V. Khymyia y fyzyko-khymyia polymerov / V. V. Anokhyn. – K.: Vyshcha shkola, 1987. – 389 s.

24.Tarutyna L. Y. Spektralnыi analyz polymerov / L. Y. Tarutyna, F. O. Pozdniakova. – L. : Khymyia, 1986. – 248 s.

25.Hanziuk A.Ia. Intensyfikatsiia protsesu koloryruvannia poliefirnykh tekstylnykh materialiv dyspersnymy barvnykamy: dys…kand. tekhn. nauk: 05.19.03 / Hanziuk Alla Yaroslavivna. – Kh. 2004. – 171 s.

26.Orhanycheskye syntetycheskye krasytely: Kataloh. – M.: NYOPYK, 1984 – 67 s.

27.Sarybekov H. S. Spravochnyk po otdelke tekstylnыkh materyalov / H. S. Sarybekov. – K.: Tekhnyka, 1984. –350 s.

28.Laboratornыi praktykum po khymycheskoi tekhnolohyy tekstylnыkh materyalov: Uchebnoe posobye dlia vuzov / T. S. Novoradovskaia y dr.; pod red. H. E. Krychevskoho. – M. : Lehprombыtyzdat, 1994. – 399 s.

29.Metodы yssledovanyia v tekstylnoi khymyy: Spravochnyk / Pod red. H. E. Krychevskoho. – M.: Mezhdunarodnaia tekstylnaia akademyia NPO “Tekstylprohress” ynzhenernoi akademyy Rossyy, Rossyiskyi zaochnыi ynstytut tekstylnoi y lehkoi promыshlennosty, 1993. – 402 s.

30.Fyzyko-khymycheskye metodы analyza. Praktycheskoe rukovodstvo: Uchebnoe posobye dlia vuzov / V. B. Aleskovskyi, V. V. Bardyn, N. Y. Bulatov ; pod red. Aleskovskoho V.B. – L. : Khymyia, 1988. – 376 s.

31.Akhnazarova S. L. Optymyzatsyia эksperymenta v khymyy y khymycheskoi tekhnolohyy / S. L. Akhnazarova, V. V. Kafarov. – M.: Vыsshaia shkola, 1998. – 320 s.

32.Rumshyskyi L.Z. Matematycheskaia obrabotka rezultatov эksperymenta: Spravochnoe posobye / L. Z. Rumshyskyi. – M.: Nauka, 1981. – 192 s.

33.Planyrovanye эksperymenta v tekhnyke / V. Y. Barabashchuk, B. P. Kredentser, V. Y. Myroshnychenko; pod red. B.P. Kredentsera. – K. : Tekhnika, 1984 – 200 s.

34.Venetskyi Y. H. Osnovnыe matematyko-statystycheskye poniatyia y formulы v эkonomycheskom analyze: spravochnyk / Y. H. Venetskyi, V. Y. Venetskaia. – 2-e yzd., pererab. y dop. – M.: Statystyka, 1989. – 448 s.

35.Yvakhnenko A. H. Modelyrovanye slozhnыkh system po эksperymentalnыm dannыm / A. H. Yvakhnenko, Yu. P. Yurachkovskyi. – M.: Radyo y sviaz, 1987. – 116 s.

36.Hanziuk A. Ya. Vplyv intensyfikatoriv na dyfuziiu dyspersnykh barvnykiv v polietylentereftalatnyi material / A. Ya. Hanziuk, H. S. Saribekov, O. I. Kulakov // Problemы lehkoi y tekstylnoi promыshlennosty Ukraynы. – 2003. – №1(7). – s. 34 – 36.

37.Askadskyi A. A. Khymycheskoe stroenye y fyzycheskye svoistva polymerov / A. A. Askadskyi, Yu. Y. Matveev. – M.: Khymyia, 1983. – 250 s.

38.Lutsыk R. V. Teplomassoobmen pry obrabotke tekstylnыkh materyalov / R. V. Lutsыk, Э. S. Malkyn, Y. Y. Abarzhy. – Kyev: Nauk. dumka, 1993. – 344 s.

39.Hanziuk A.Ia. Vplyv riznykh faktoriv na hranychnu nafarbovanist poliefirnoho volokna / Hanziuk A.Ia., Kulakov O.I. // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia. – 2004. – №1. – s.107–111.

Надійшла / Paper received : 15.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-194-198
УДК 687.016:687.15

Г.М. ТОКАР, А.І. РУБАНКА,
Т. В. ЛУЦКЕР, Ю.В. ВЕСЕЛА, Н.В. ОСТАПЕНКО, М.В.КОЛОСНІЧЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇЇ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ

Досліджено сучасний стан проблеми та умов експлуатації захисного одягу військовослужбовців для розробки нових моделей з високими показниками надійності. Використано загальний метод аналізу літературних джерел, методологію системного підходу до проектування захисного одягу для військовослужбовців спеціальних підрозділів. Розроблено підходи до створення різновидів вітчизняного надійного захисного одягу для військовослужбовців, що відповідатиме комплексу жорстких і суперечливих вимог, обумовлених його функціональним призначенням. Вивчено умови експлуатації захисного одягу військовослужбовців та структуризовано їх за різними ознаками.

Ключові слова: захисний одяг військовослужбовців, умови експлуатації, небезпечні та шкідливі фактори, «військовослужбовець - одяг – середовище».

G.M. TOKAR, A.I RUBANKA,
T.V. LUTSKER, YU.V. VESELF, N.V. OSTAPENKO, M.V. KOLOSNICHENKO
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF CONDITIONS OF OPERATION OF PROTECTIVE CLOTHES OF MILITARY SERVANTS

The article deals with the problem of design and development of modern protective clothing for military of the Armed Forces of Ukraine and proposes the ways of its solving by expanding ways of using protective. The problems of the current state and ways of using protective clothing for servicemen to develop new models with high reliability are studied. It is established that in the expected operating conditions the equipment and uniforms are aimed at ensuring the maximum possible protection of the military from various dangers and a high probability of saving lives in the event of an emergency. The general method of the analysis of literature sources, methodology of the system approach to designing of protective clothing for servicemen of special divisions is used. The method of system-structural analysis was used, graphics were developed in the graphic editor. Requirements for these products are formulated. In order to achieve the goal the existing types of protective outfit was analyzed. The assortment type of protective clothing for the military is substantiated in order to ensure their optimal physiological and psychological condition. Approaches to the creation of varieties of domestic reliable protective clothing for servicemen that meet a set of strict and contradictory requirements due to its functional purpose have been developed. The study aims to increase the effectiveness of protection of servicemen, reduce the level of injuries and deaths of soldiers, the formation of a rational structure of the range of fireproof clothing for a given set of military accounting specialties with the introduction of modern information technology, creation and implementation of technologically rational and aesthetically ergonomic able to meet the needs of the Armed Forces. The conditions for the use of protective clothing for servicemen have been studied and structured according to various features.

Key words: protective clothing for servicemen, operating conditions, dangerous and harmful factors, "serviceman - clothing - environment".

Вступ

Нестабільна ситуація на сході держави, міжнародний тероризм, інтенсивність прояву та направленість зовнішніх загроз для національної безпеки України зумовлюють розробку нових вимог до системи забезпечення військової безпеки країни. Військове спорядження є одним з найважливіших складових, що визначають боєздатність армії. Забезпечення військових сучасними вітчизняними виробами та іншими речами при виконанні службових обов'язків, та в період бойових дій регламентується наказом № 232 від 29 квітня 2016 Міністерства Оборони України «Про речове забезпечення військовослужбовців Збройних Сил України»

Все це вимагає від спеціалістів постійної роботи удосконалення військового захисного одягу, зокрема для військовослужбовців спеціальних підрозділів.

Постановка завдання

Встановлено, що на сьогодні вітчизняні та закордонні підприємства по виготовленню захисного одягу для військовослужбовців, пропонують досить широкий асортимент виробів, значна частина яких не повністю задовольняє їх потреби, адже не завжди забезпечує та враховує реалізацію специфічних потреб виробничого середовища. На етапі проектування розробники не завжди враховують вимоги існуючої нормативної документації, умови експлуатації, властивості матеріалів, з яких виготовляються вироби.

При проектуванні захисного одягу для військових необхідним є розробка конструктивно-технологічних рішень, які здатні забезпечити висунуті до нього вимоги з урахуванням сучасної інформації про призначення, новітні наукові розробки, умови експлуатації в системі «людина – військовий одяг – середовище».

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Захисний одяг являє собою повний або частковий бар'єр між людиною і навколишнім середовищем. При цьому він повинен забезпечувати захисну функцію, і водночас не викликати порушення фізіологічних функцій організму (порушення діяльності серцево-судинної системи, утруднення теплообміну з навколишнім середовищем та ін.). Особливу увагу приділяють ергономічним аспектам, що забезпечують в

комплексі поєднання безпеки і зручності (комфорту) користувача. Військовий захисний одяг являє собою складний асортимент виробів, до яких висувається комплекс жорстких і суперечливих вимог, пов'язаних із функціональним призначенням. Створення військового захисного одягу на сучасному етапі – складне завдання через різноманітність умов його використання у процесі професійно-кваліфікаційної діяльності, а саме - кліматичних умов, високого фізичного та психологічного навантаження [1-2].

Результати дослідження

Для створення сучасного ефективного одягу для військовослужбовців спеціальних підрозділів детально проаналізовано умови експлуатації, як початковий і фундаментальний етап проектування, складовими елементами якого є визначення небезпечних та шкідливих факторів, що діють на людину під час виконання своїх службових обов'язків а також особливості виконуваних робіт та існуючі засоби індивідуального захисту.

Для визначення стану проблеми розробки захисного одягу для військовослужбовця потрібно враховувати основні дані, які необхідні для його створення, складовими яких є (рис. 1) [3-4]:

- сумісність з засобами індивідуального захисту та технічним спорядженням;
- особливості виконуваних робіт;
- види небезпечних та шкідливих факторів.

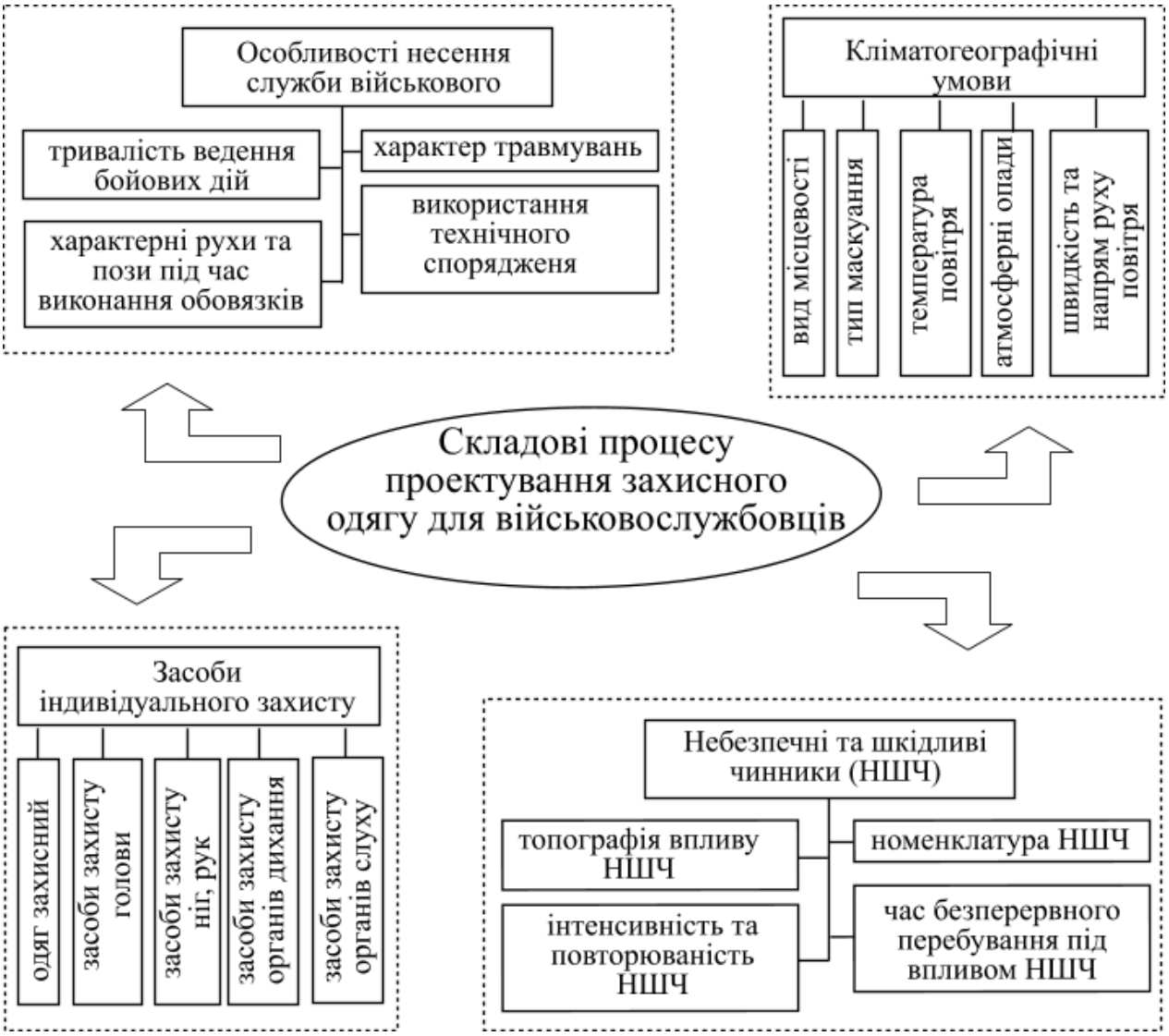


Рис. 1. Підхід до дизайн-проектування захисного одягу для військовослужбовців

Специфічні вимоги для різних родів військ залежать від участі у бойових діях, які здійснюються у різних географічних (гори, рівнина, низовина), кліматичних (північні, південні райони), природних (місто, ліс, пустеля) умовах, вдень або вночі. Під час ведення бойових дій військовослужбовець виконує характерні рухи та пози відповідно ситуації та поставлених завдань. В залежності від тривалості бойових дій визначається характер впливу НШФ та травмувань на організм людини.

Стосовно діяльності людини згідно умов праці потрібно враховувати наявність різноманітних чинників, які негативно впливають на організм людини. Згідно з «Гігієнічною класифікацією праці та

небезпечних чинників виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затвердженою наказом МОЗ України № 248 від 08.04.14р., [5] умовами праці є сукупність чинників виробничого середовища та трудового процесу, які впливають на здоров'я й працездатність людини в процесі її професійної діяльності. Визначення та аналіз чинників, які вливають на організм військовослужбовця під час виконання службових обов'язків є початковою необхідністю для розробки ергономічного та надійного одягу [6-7]. Перелік небезпечних і шкідливих факторів, що діють під час виконання бойових задач надано на рисунку 2.

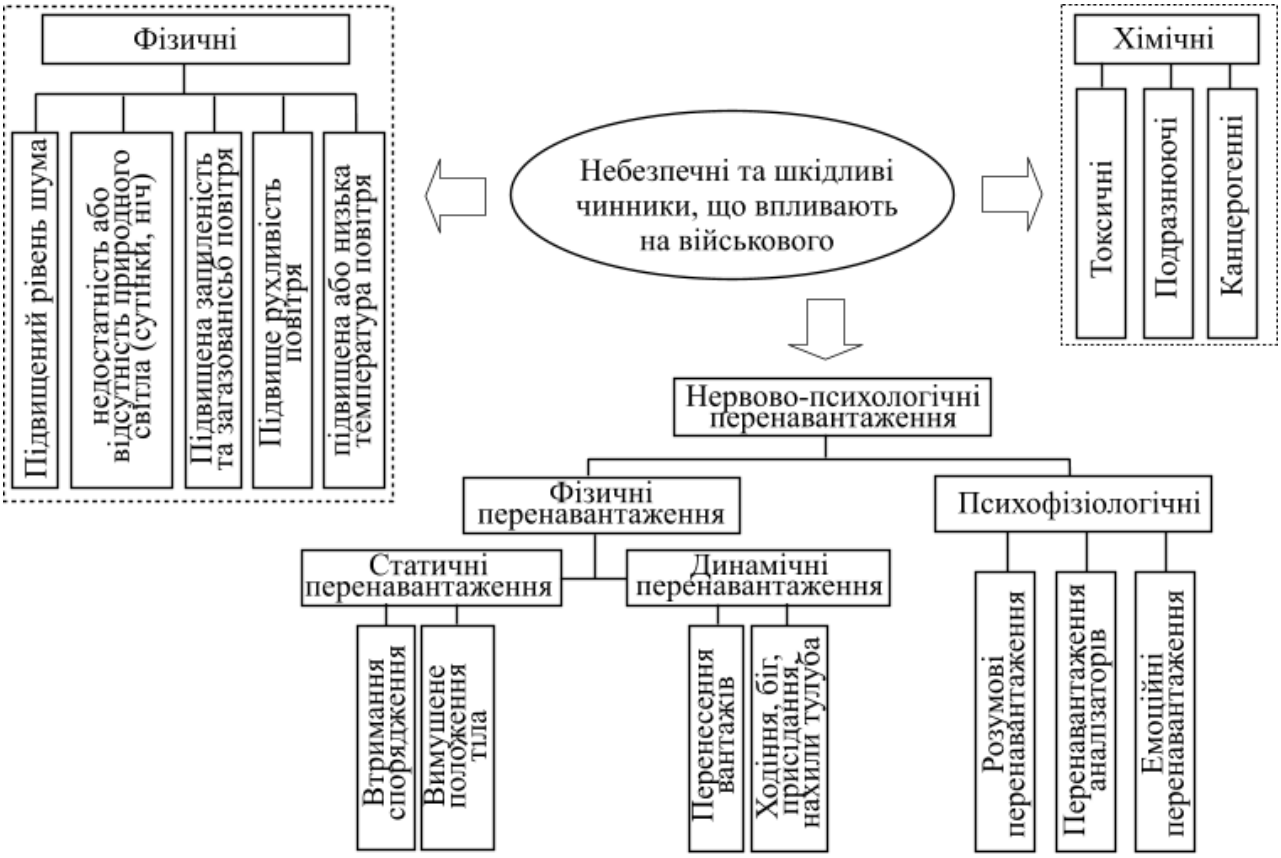


Рис. 2. Номенклатура небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на військовослужбовця

Особливістю несення служби військового є постійна зміна фізичної активності, інтенсивний рух змінюється на довготривале сидіння, наприклад під час виконання бойових завдань. Слід зазначити, що маса спорядження може досягати 45 кг, що призводить до статичного та динамічного навантаженням значної кількості м'язів ніг, плечей, шиї та рук. М'язи перебувають довгий час у скороченому стані і не розслабляються, що погіршує кровообіг. В результаті виникають больові відчуття в руках, шиї, верхній частині ніг, спині та плечових суглобах. При обмеженні активності можуть виникати порушення функцій організму (опорно-рухового апарату, кровообігу, дихання, травлення тощо). Умови діяльності військовослужбовця висувають високі вимоги до рівня психологічної стійкості. Виконання бойового завдання супроводжується емоційно-психічним напруженням, уникненням небезпеки. Невміння контролювати свій психічний стан та керувати ним в екстремальних умовах може призвести до загибелі людини. Бойові фактори – широкий спектр змінних, що визначають ті або інші реакції, стан, поведінку військовослужбовця під час завдання. Дані військово-психологічних досліджень дозволили виявити особливу дієвість таких бойових факторів, як вид, умови та інтенсивність бойових дій, особливості застосовуваної зброї, надійність засобів захисту, тимчасові, природно-географічні, погодно-кліматичні умови, обсяг і співвідношення втрат сторін.

Військовий захисний одяг повинен сприяти підвищенню комфортність військовослужбовця, адже від того, наскільки раціонально у ньому поєднуються різні елементи, як він відповідає своєму функціональному призначенню, залежить процес професійної, оперативно-службової та навчальної підготовки.

Забезпечуючи військовослужбовця всіма необхідними речами потрібно врахувати раціонально розроблене індивідуальне екіпірування, що сприятиме високій фізичній активності і боєздатності військовослужбовців. Комплект екіпіровки складається з двох частин:

- бойової – обмундирування, індивідуальне спорядження, зброя та боєприпаси;
- господарської – предмети, необхідні для організації побуту в польових умовах.

Індивідуальне спорядження військовослужбовців складається з:

- розвантажувально-поясної системи;
- сумки для магазинів для автомата;
- сумки під гранати;
- чохла для фляги та саперної лопати,
- чохла для захисних рукавичок і панчіх;
- рюкзака, в який укладають плащ-палатку, запасну білизну і онучі, казанок, кухоль, раціон продовольства або сухий пайок. В кишеню речового мішка поміщають туалетні приналежності, рушник, ложку тощо.
- захисного шолому;
- бронежилету [8].

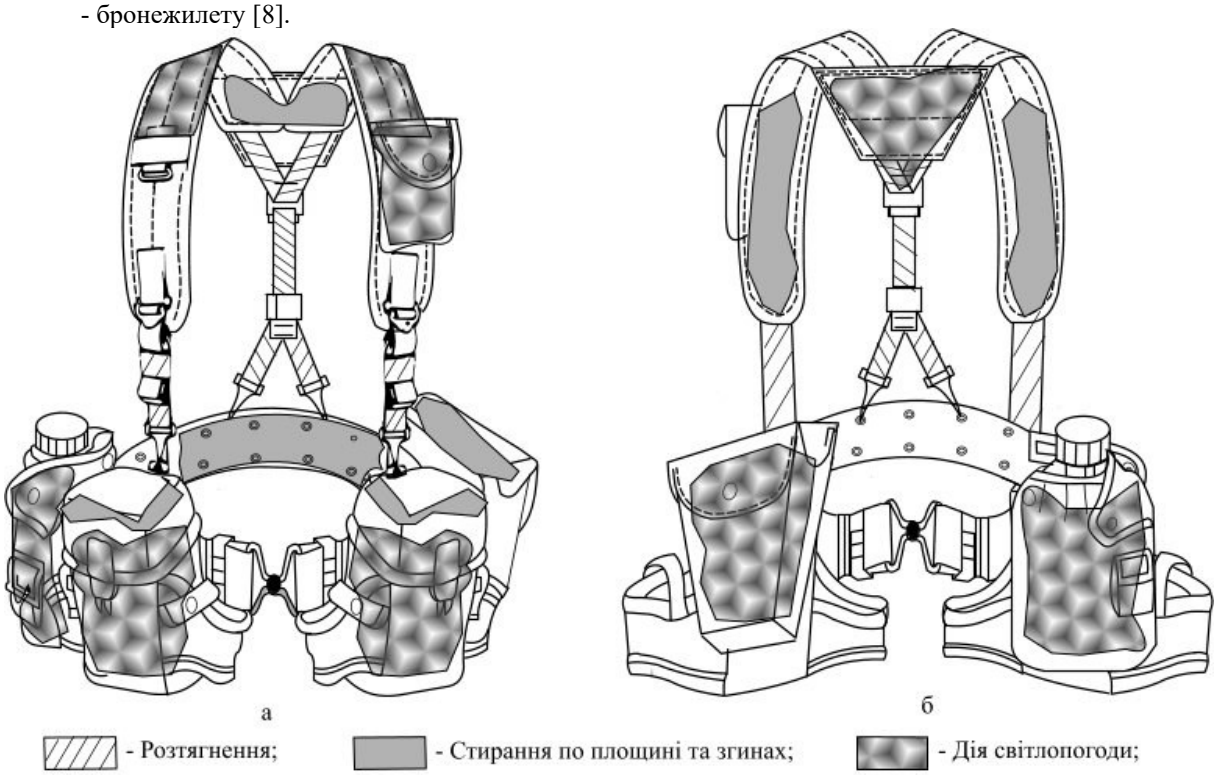


Рис. 3. Топографія впливу небезпечних та шкідливих чинників, які діють на розвантажувально-поясну систему: а – вигляд спереду; б – вигляд ззаду

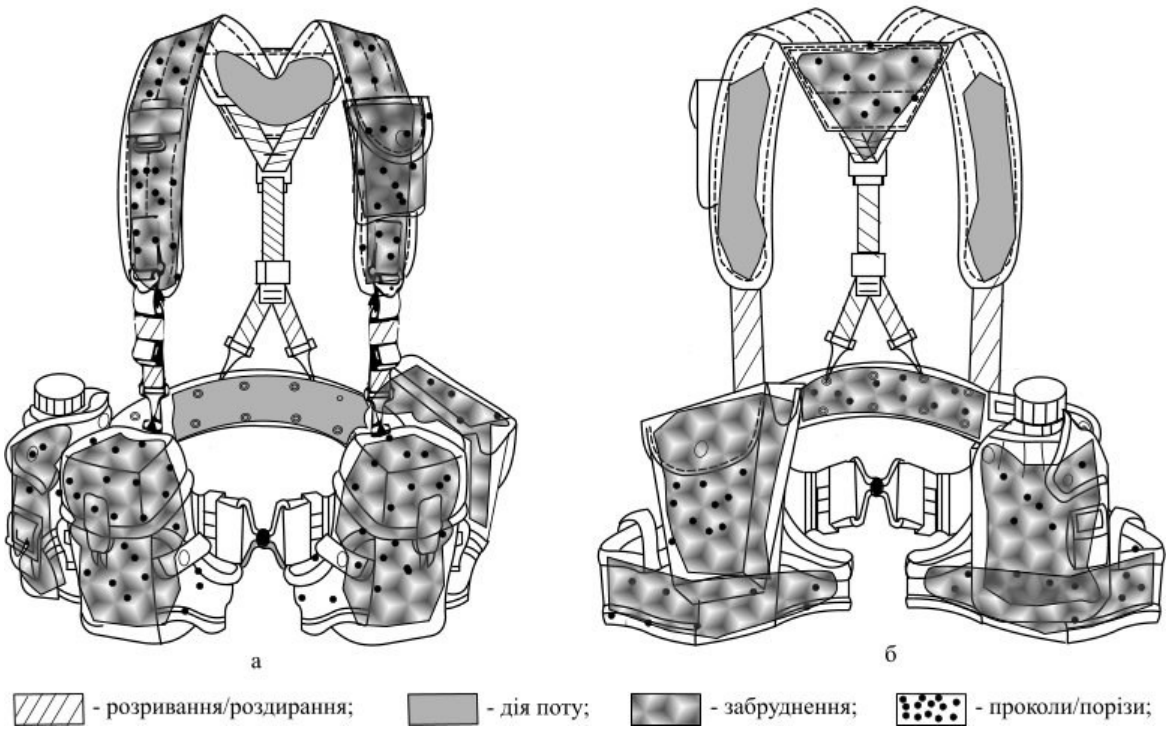


Рис. 4. Топографія впливу небезпечних та шкідливих факторів, які діють на РПС: а – вигляд спереду; б – вигляд ззаду

Спорядження військовослужбовця являє собою складний асортимент, до якого висувається комплекс жорстких і суперечливих вимог пов'язаних із спеціальним призначенням. Саме тому, створення розвантажувально-поясної системи на сучасному етапі – це складне завдання через різноманітність умов використання військовослужбовцями, котрі в процесі професійної діяльності стикаються з агресивними чинниками оточуючого середовища, а саме змінними кліматичними умовами, за умов фізичного та психологічного навантаження.

Розвантажувально-поясна система повинна максимально відповідати комплексу показників призначення, надійності, ергономічності, технологічності та економічності. Основним завданням процесу проектування є вибір таких конструктивно-технологічних рішень, які відповідають висунутим вимогам, і враховують всю інформацію про призначення, умови експлуатації і новітні наукові розробки.

Аналіз умов експлуатації військового екіпірування дозволив розробити топографію впливу НШФ в системі «людина-військовий одяг-середовище» (рис. 3, 4).

Висновки

Відповідно до повного оцінювання професійно-кваліфікаційної діяльності військовослужбовця, специфіки виробничо-кліматичних умов визначено номенклатуру небезпечних та шкідливих чинників і запропоновано топографію їх впливу на захисний одяг. Дію цих видів небезпеки можна зменшити застосуванням науково-обґрунтованих підходів до створення сучасного захисного одягу вітчизняного виробництва. Це можливо шляхом удосконалення конструктивного устрою з використанням новітніх матеріалів та створенням раціональних пакетів.

Література

1. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1) ГОСТ 12.0.003-74 ИЗДАНИЕ (февраль 2002 г.) с Изменением N 1, утвержденным в октябре 1978 г. (ИУС 11-78) Межгосударствений стандарт- М.: ИПК Издательство стандартов, 2002
2. Легенька Л.В., Екологічні аспекти виготовлення та експлуатації військової форми // Тези доповідей студентської наукової конф. «Екологічна безпека довкілля. Проблеми та шляхи вирішення». – Л.В Легенька, Герасимов В.В. - Ужгород. – 2009. – С. 45.
3. Корольчук М. С. Практикум з психології військової діяльності : навчально-методичний посібник / М. С. Корольчук. – К. : КВГІ, 1997. – 138 с.
4. Міністр оборони України підписав наказ «Про речове забезпечення військовослужбовців Збройни х Сил України» [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0767-16
5. Наказ Міністерства Охорони здоров’я України «Гігієнічна класифікація праці та небезпечних чинників виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затвердженою наказом МОЗ № 382 від 31.12.97
6. Першин В.А Исследования системы “человек – одежда – среда” метод подобия / В.А Першин , Осипенко Л.А., Тишина Н.В.
7. Дизайн-проектування виробів спеціального призначення: навч. посіб. /Н.В. Остапенко, М.В. Колосніченко, Т.В. Луцкер та ін. – К.: КНУТД, 2016. – 320с.
8. Наказ Міністерства оборони України від 18.07.2017 N 370 "Про затвердження зразків військової форми одягу та знаків розрізнення військовослужбовців Збройних Сил України та ліцеїстів військових ліцеїв", зареєстрований у Міністерстві юстиції України 22 серпня 2017 р. за N 1047/30915 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://document.org.ua/pro-zatverdzhennja-zrazkiv-viiskovoyi-formi-odjagu-ta-zagaln-doc319731.html

References

1. Systema standartov bezopasnosty truda (SSBT). Opasnыe y vrednыe proyzvodstvennыe faktorы. Klassyfykacyja (s Yzmenenyem N 1) GhOST 12.0.003-74 YZDANYE (fevralj 2002 gh.) s Yzmenenyem N 1, utverzhdennыm v oktjabre 1978 gh. (YUS 11-78). Mezhghosudarstvenyj standart- M.: YPK Yzdateljstvo standartov, 2002
2. Leghenjka L.V., Ekologhichni aspekty vyghotovlennja ta ekspluataciji vijsjkovoji formy // Tezy dopovidej studentsjkoji naukovoji konf. «Ekologhichna bezpeka dovkillja. Problemy ta shljakhy vyrishennja». – L.V Leghenjka, Gherasymov V.V. - Uzhghorod. – 2009. – C. 45.
3. Koroljchuk M. S. Praktykum z psykhologhiji vijsjkovoji dijaljnosti : navchalj¬no-metodychnyj posibnyk / M. S. Koroljchuk. – K. : KVGhI, 1997. – 138 s.
4. Ministr oborony Ukrajiny pidpysav nakaz «Pro rechove zabezpechennja vijsjkovosluzhbovciv Zbrojnykh Syl Ukrajiny» [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0767-16
5. Nakaz Ministerstva Okhorony zdorov'ja Ukrajiny «Ghighijenichna klasyfikacija praci ta nebezpechnykh chynnykiv vyrobnychogho seredovyshha, vazhkosti ta napruzhenosti trudovogho procesu», zatverdzhenoju nakazom MOZ # 382 vid 31.12.97
6. Pershyn V.A Yssledovanyja systemы “chelovek – odezhda – sreda” metod podobyja / V.A Pershyn , Osypenko L.A., Tyshyna N.V.
7. Dyzajn-proektuvannja vyrobiv specialjnogho pryznachennja: navch. posib. /N.V. Ostapenko, M.V. Kolosnichenko, T.V. Lucker ta in. – K.: KNUTD, 2016. – 320s.
8. Nakaz Ministerstva oborony Ukrajiny vid 18.07.2017 N 370 "Pro zatverdzhennja zrazkiv vijsjkovoji formy odjaghu ta znakiv rozriznennja vijsjkovosluzhbovciv Zbrojnykh Syl Ukrajiny ta licejistiv vijsjkovykh licejiv", zarejestrovanyj u Ministerstvi justyciji Ukrajiny 22 serpnja 2017 r. za N 1047/30915 [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: http://document.org.ua/pro-zatverdzhennja-zrazkiv-viiskovoyi-formi-odjagu-ta-zagaln-doc319731.html

Надійшла / Paper received : 16.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-199-206
УДК 681.5:664+681.5:621.565

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ,
О.К. КОПАЙГОРА, Д.П. ЗАІКІНА, В.І. НЕВІДІН
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ЗАМОРОЖУВАНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

Теоретично доведено, що ідентифікація процесів виробництва заморожуваних продуктів харчування здійснюється шляхом визначення режимів роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою методів оптимізації немінімальнофазових об'єктів харчової промисловості визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє побудувати алгоритми керування, які адаптуються до змін параметрів об'єкту. Розроблено адаптивні системи оптимального керування процесами виробництва хлібобулочних виробів, що дозволяє підвищити якість керування цими процесами при зміні їх параметрів і режимів роботи , збуреного середовища та цілей керування. Алгоритми реалізовані за допомогою сучасних мікропроцесорних систем, які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують автоматично квазіоптимальне налагодження систем керування технологічними стадіями виробництва продуктів харчування. Встановлено, що оптимальні показники якості регулювання при виробництві заморожуваних продуктів досягаються за допомогою адаптивних цифрових регуляторів, а саме: при використанні адаптивних цифрових регуляторів у системі керування стадіями виробництва заморожуваних сортів хліба, дисперсія регулювального параметру знизилась в 2,1 раз, а час перехідного процесу зменшиться на 25% у порівнянні в ПІД-регулюванням.

Ключові слова: ідентифікація, алгоритми керування, адаптація, адаптивні системи, керування виробництвом, заморожування хлібобулочних виробів.

V.P. KHOROLSKYI, YU.M. KORENETS,
O.K. KOPAYHORA, D.P. ZAIRINA, V.I. NEVIDIN,
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine

AUTOMATED PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMSFROZEN FOODS

In the process of providing the population of the Dnieper region with man-made areas with "smart" food, the main role is played by the high-quality food industry. Demographic and socioeconomic trends in the deteriorating health of people living and working in contaminated areas in the context of the Covid-19 pandemic require scientists to develop a nutrition system and technologies for the production of nutrient-balanced multicomponent foods. This problem must be solved through the introduction of high technology (high technology), using automated robotic systems, biotechnology (Biotech), nanotechnology (Nanotech) and information and communication technologies (Ictech).

Abstract It is theoretically proved that the identification of frozen food production processes is carried out by determining the modes of operation of the controlled process and the dimension of its state, based on which the optimization of non-minimum phase objects of the food industry determines the structure and parameters of the process model to change the parameters of the object.

Adaptive systems of optimal control of the processes of production of bakery products have been developed, which allows to improve the quality of control of these processes while changing their parameters and modes of operation, perturbed environment and management goals. The developed algorithms are implemented with the help of modern microprocessor systems that work as identifiers and provide automatic quasi-optimal adjustment of control systems for technological stages of food production.

It is established that the optimum quality of regulation in the production of bread is achieved with the help of adaptive digital regulators, namely: when using adaptive digital regulators in the control system of stages of production of frozen varieties of bread, the variance of the regulatory parameter is reduced by 2.1 times and the time of the transition process will be reduced by 25 % compared to PID control.

Keywords: dentification, control algorithms, adaptation, adaptive systems, production management, freezing of bakery products.

Постановка проблеми. У процесі забезпечення населення Придніпровського регіоні з техногенними територіями «розумними» продуктами харчування головну роль відіграє індустрія харчових продуктів високої якості. Демографічні та соціально-економічні тенденції погіршення здоров'я людей, що мешкають і працюють на забруднених територіях в умовах пандемії Covid-19 вимагають від науковців розробки системи раціонального харчування та технологій виробництва полікомпонентних харчових продуктів, збалансованих по нутрієнтному складу. Цю проблему потрібно вирішувати за рахунок впровадження високих технологій (high technology), з використанням автоматизованих робототехнологічних комплексів, біотехнологій (Biotech), нанотехнологій (Nanotech) та інформаційно-комунікаційних технологій (Ictech)[1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасній практиці автоматизованого виробництва високоякісної продукції харчування для регіонів з високим рівнем забруднення є тенденція збільшення виробництва охолоджених і заморожуваних напівфабрикатів та готових продуктів з використанням цифрової платформи «Їжа» [2]. Ця тенденція тісно пов'язана з проблемою забезпечення екологочистою вітчизняною сировиною, ефективних способів її переобки з упровадженням робототехнологічних комплексів, алгоритмів керування, програмного забезпечення (ПЗ) цифрової платформи «Їжа». Питаннями автоматизованого виробництва харчів в Україні займаються вчені багатьох ЗВО, серед них Б.М.Гончарук, А.П.Ладанюк, В.Г.Трегуб, І.В.Ельперін, Л.О. Злобін, С.М.Швед, Я І. Проць та багато інших вчених і наукових колективів [3, 4]. У період коронавірусних пандемій збільшення об'ємів виробництва продуктів

для здорового харчування з використанням білкових інгредієнтів рослинного і тваринного походження можливо за рахунок розробки пакету цифрових технологій тасистеми алгоритмізованих взаємовідносин споживачів здорового харчування з виробниками у вигляді інформаційної системи виробництва «розумної» продукції з промисловим Інтернет-речей [2]. Подібні системи розроблені на основі технологій Indystria-4.0 в країнах ЄС і представляють значний інтерес для харчової промисловості України. Метою статті є розробка автоматизованих систем керування виробництвом продуктів харчування з вбудованими цифровими платформами та робототехнічними інтенсифікаторами процесів заморожування напівфабрикатів і готової продукції.

Виклад основного матеріалу досліджень. Автоматизоване виробництво харчів – хлібобулочних виробів для людей, що мешкають на територіях з техногенним тиском представляє собою складне роботизоване виробництво. Важливою ознакою такої системи є використання цифрової платформи «Їжа», промислового інтернет речей, SCADA І MES-системи та інтелектуальних датчиків pH-параметрів, запаху, температурних режимів роботи технологічних апаратів та робототехнічних інтенсифікаторів (РІК) гетерогенного середовища, програмного забезпечення (ПЗ), міні-ЕОМ.На вхід $\{\bar{X}\}$ виробничої системи надходять параметри $\{x_1, x_2, x_3, \ldots x_n\}$ що характеризують робочі характеристики сировини, води, електрики, газу. Вихідні параметри виробничої системи $\bar{Y}_1$, $\bar{Y}_2$ $\bar{Y}_3$ – відповідно хліба, заморожуваного хліба і заморожуваного тіста [1]. На рис.1наведено автоматизовану систему керування технологічної лінії (АСКТЛ) з виробництва смарт-продуктів харчування – хлібобулочних виробів з лікувальними характеристиками, в якій використано адаптивні системи керування (АСК), а саме: дільниці сировини $АСК_{д.в.}$; $АСК_{д.о.}$ – дільниці опари; $АСК_{д.т.}$ – дільниці виробництва тіста; $АСК_{д.в.}$ – дільниці випікання; $АСК_{д.з.т.}$ – дільниці заморожування тіста; $АСК_{д.з.х.}$ – дільниці заморожування хліба. АСКТЛ через інформаційну шину Profibus DP зв'язана з цифровою платформою «Їжа», промисловим інтернет речей, SCADA-системами, та міні-ЕОМ з програмним забезпеченням (ПЗ) та робототехнічними інтенсифікаторами (РІК). Останні взаємодіють з гетерогенним середовищем опара-тісто і за рахунок керованих кавітаційних впливів відіграють важливу роль в процесі збагачення тіста природними біокоригуючими інгредієнтами [1, 4, 5].

Виникає завдання щодо розробки цифрових адаптивних алгоритмів стабілізації вихідних параметрів об'єкту переробки сировини (борошна) в продукцію з лікувально- профілактичними властивостями.

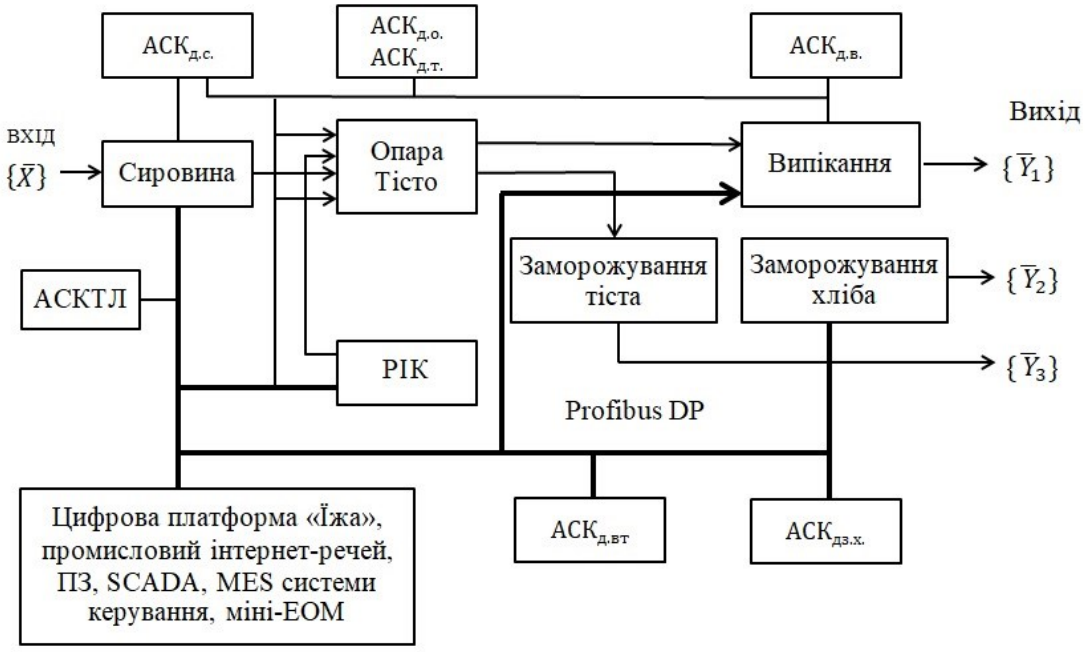


Рис. 1. Автоматизована система керування виробництва хлібобулочних виробів.

Ці алгоритми реалізуються за допомогою сучасних мікропроцесорних систем (МП), які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують автоматичне квазіоптимальне налагодження систем. Передавальна функція системи керування стабілізації регулюємого параметру (густини тіста,) може бути записано у вигляді рівняння:

$$W_{сист}(P) = \frac{W_{рег}(P) * W_{об}(p)}{W_{рег}(P) * W_{об}(P) + 1} \quad (1)$$

При цьому об'єкт регулювання опишемо:

$$Wоб(P)=\frac{K_D E^{-p\tau}}{T_P+1}=\frac{E^{-p\tau}}{\frac{T}{K_0}*p+1/K_0}=\frac{E^{-p\tau}}{a_1 p+a_0} \quad (2)$$

де a_1= Т/Ко, a_o=1/Ко – коефіцієнти.

Після підстановки в рівняння (6) виразу (7) одержимо :

$$W_{сист}(P)=\frac{(K_П(P)+K_1)e^{-\tau p}}{p(a_1 p+a_0)+(K_n p+K_1)e^{-\tau p}} \quad (3)$$

Якщо подати на вхід системи стрибок q(t) передавальну функцію (8) запишемо:

$$W(p)=\int_0^\infty q(t)e^{-p\tau}dt=\int_0^\infty q(t)\sum_{i=0}^{\infty}\frac{(-1)}{i!}p^i(t)dt=\sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i p^i\int_0^\infty a(t)t^i\frac{1}{t!}dt=\sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i p^i\mu^i \quad (4)$$

де $\mu_i=\int_0^\infty q(t)\frac{t^i}{i!}dt$ –момент функції.

Ряд у виразі (8) одержано в результаті розкладу e^{-pt} в ряд $\sum_{i=0}^{\infty}\frac{(-1)^i(p\tau)^i}{i!}$ та зміною порядку операції сумування та інтегрування, що допустимо внаслідок розмірної збіжності степеневого ряду. Порівняємо вирази (9) та (8), а також замінюючи $e^{-p\tau}$рядом одержимо:

$$\sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i p^i\mu_i[a_i p^2+a_1 p+(K_П p+K_i)\sum_{j=0}^{-\infty}\frac{(-1)^j}{j!}\tau^j p^j]=(K_П p+K_i)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k}{k!}\tau^k p^k \quad (5)$$

Порівнюючи в лівій і правій частинах коефіцієнти при одних і тих ступенях р, одержимо систему рівняння виду:

$$\mu_0 a_0+\mu_0 k_П+K_I\mu_1(-1)^1+\mu_0 K_1(-1)^1\tau=K_П+K_I(-1)^1\tau \quad (6)$$

для першого ступеня р.

$$\mu_0 a_1+(-1)^1\mu_1 a_0+(-1)^i\mu_i K_П+\mu_0 K_П(-1)^1\tau+K_I\mu_2+\mu_1\tau K_I+\frac{1}{2}\mu_0 K_I\tau^2=(-1)^1\tau K_П+\frac{k_I}{2}\tau^2 \quad (7)$$

для другого ступеня р

$$(-1)^2\mu_1 a_1+(-1)^2\mu_2 a_0+(-1)^1\mu_1 K_П\tau+\mu_2 K_{ПР}+\frac{1}{2}\mu_0 K_П\tau^2+(-1)^2 K_I\mu_3+(-1)^2\mu_2\tau K_I+$$
$$+(-1)^2\mu_2 K_I(-1)\tau+(-1)^1\mu_1 K_I\frac{1}{2}\tau^2+\frac{1}{6}\mu_0 K_I\tau^3=\frac{1}{2}K_П\tau^2+\frac{1}{6}K_I(-1)^3\tau^3 \quad (8)$$

для третього ступеня.

Обчислюємо рівняння (13) відносно a_0 і одержимо :

$$a_0=\mu_1 K_П K_1+K_1\tau+\frac{K_П}{\mu_0}-\frac{K_I\tau}{\mu_0} \quad (9)$$

Обчислюємо рівняння (14) відносно a_1 і підставимо замість a_0 його значення та одержимо квадратичне рівняння виду :

$$a_1=\frac{\mu_1}{\mu_0}(\mu_1 K_П K_I+K_I\tau+\frac{K_П}{\mu_0}-\frac{K_I\tau}{\mu_0})+K_П\tau+\frac{\mu_1}{\mu_0}K_П-\frac{1}{2}K_I\tau^2-\frac{\mu_1}{\mu_0}K_I\tau-\frac{\mu_2}{\mu_0}K_I-\frac{K_П}{\mu_0}\tau+\frac{1}{2\mu_0}K_I\tau^2 \quad (10)$$

Підставляючи a_0 і a_1 і a_1 в рівняння (15) одержимо кубічне рівняння:

$$\frac{\mu_1}{\mu_0}K_I\tau-\frac{\mu_1^2}{\mu_0^2}K_I\tau+2\mu_1K_{II}\tau-\frac{\mu_1^2}{\mu_0}K_I\tau-\frac{\mu_1}{\mu_0}K_{II}\tau+\mu_2K_{II}\tau-\frac{\mu_2}{\mu_0}K_I\tau-\mu_2K_{II}\tau-\frac{1}{2}\mu_1K_I\tau^2+\frac{1\mu_1}{2\mu_0}K_I\tau^2+$$
$$+\frac{1}{2}\mu_0K_{II}\tau^2-\frac{1}{2}\mu_1K_I\tau^2+\frac{1}{2}K_{II}\tau^2-\frac{1}{6}\mu_0K_I\tau^3+\frac{1}{6}K_I\tau^3+\frac{\mu_1}{\mu_0}K_{II}K_I+\frac{\mu_1^2}{\mu_0}K_{II}+\frac{\mu_1^2}{\mu_0}K_{II}-\frac{\mu_1\mu_2}{\mu_0}K_I+$$
$$+\mu_1\mu_2\tau^3++\frac{\mu_1}{\mu_0}K_{II}K_I+\frac{\mu_1^2}{\mu_0}K_{II}+\frac{\mu_1^2}{\mu_0}K_{II}-\frac{\mu_1\mu_2}{\mu_0}K_I+\mu_1\mu_2K_{II}K_I+\frac{\mu_2}{\mu_0}K_{II}+\mu_0K_{II}+\mu_3K_I=0 \quad (11)$$

За умовою ідентифікації процесу виробництва хлібобулочних виробів межі знаходження кореня $\tau_{\min}\le\tau<\tau_{\max}$ $\tau_{\min}\le\tau<\tau_{\max}$, то ці рівняння легко обчислюються методом Бісекції (золотого перетину) [6]. Знайдений корінь τ^* буде значенням часу запізнення. Після чого, підставляючи τ_1^* в рівняння (14, 15) одержимо відповідно значення a_0^* i a_1^*.

В системі, в якості блока ідентифікації використано МП, який виконує наступні функції:

1. Видає команду щодо введення сигналу в систему керування (фіксує момент подачі скачка) від РІК.
2. Вводить в пам'ять значення імпульсної перехідної функції в момент t.
3. Обчислює моменти за формулою:

$$\mu_i=\sum_{j=0}^{N}q(t_j)t_j^i\frac{1}{i!}(t_j-t_{j-1}) \quad (12)$$

4. Обчислює рівняння (11) методом Бісекції
5. Визначає τ^*, a_0^*, a_1^* τ^*, a_0^*, a_1^*.
6. Перераховує K_0, T.
7. За методом максимального ступеня стійкості корегує коефіцієнти K_{II} i K_I

Блок – схема адаптивної цифрової системи керування тістомісильного відділення (технологічні апарати 1,2, 3,4 .5,6,7,8) наведена на рис 2.

Ця система працює в циклі з робототехнологічним комплексом виробництва тістових напівфабрикатів 8. та робототехнічної системи замороження 9 хліба 10 Якість борошна та опари в системі керування вимірюється інтелектуальним датчиком Д1 склад тіста (запах) – датчиком Д2. Цифрові сигнали з інтелектуальних датчиків Д1,Д2, Д3,Д4 ,надходять на пристрій введення (ПВВ) МП 1, який в подальшому розраховує коефіцієнти a_0, a_1, a_2, а також чинники K_0, Т. За методом максимальної ступені стійкості МП розраховує також коефіцієнти K_{II} i K_I ПІ – регуляторів Р1,Р2. Регулятор Р1 відпрацьовує сигнал керування, який за допомогою тристороннього перетворювача ТПЧ1 і двигуна АД1 змінює продуктивність агрегату Н щодо транспортування опари в тістомісильну машину 5. Система адаптивного керування мішалкою 6 з регулятором Р2 та виконавчими механізмами ВМ1, ТПЧ2, АД2 керує продуктивністю апаратів 5 та 7.

Така система цифрового керування комплексом дозволяє збільшити продуктивність стадії випікання хліба на 6-7% [1]. В останні п'ять років у процесі виконання портфеля замовлення ОПР та топ–менеджери хлібозаводів, які працюють на стадію заморожування хліба $\overline{Y_2}$ $\overline{Y_3}$ стикаються з високими вимогами споживачів до їх продукції. В цьому випадку виникає необхідність розробки цифрових алгоритмів керування процесом виробництва заморожуваних сортів хліба з контролем вхідних і вихідних змінних за допомогою інтелектуальних датчиків Д3, Д4, Д5.

Нехай за інформацією інтелектуальних датчиків на хлібозаводах контролюються вхідні x(t) і вихідні y(t) чинники. Роботу тістомісильних агрегатів будемо контролювати за наступними каналами: а) сила борошна та якість інгредієнтів і закваски [1, 4, 5]. б) процентний вміст густини тіста та його запах в зливі тістомісильної машини; в) питома вага борошна і питома вага опари в стадіях виробництва тіста. Динаміку цих агрегатів опишемо лінійним диференційним рівнянням виду :

$$\sum_{i=0}^{n}a_iy^i(t)=x(t-\tau), \quad (13)$$

де x(t) та y(t) – вхідний та вихідний сигнали об'єкту досліджень; a_i $(i = 0,1,2,...,n)$, τ – квазістаціонарні параметри об'єкту, при цьому a_i - параметри ідентифікації [1,6]. Параметри a_i, τ приймають значення із діапазону

$$a_{i\min} \le a_i \le a_{i\max}, \ i=0,1,\ldots,n, \ \ 0 \le \tau \le \tau_{\max} \tag{14}$$

За сигналами x(t) та y(t), які ми можемо вимірювати, необхідно визначити поточні значення параметрів a_i i τ $a_i i\tau$ (i = 0,1…, n). Для об'єкта, який працює в замкненому контурі з регулятором, коли вхідний сигнал має достатньо широкий частотний спектр (має безперервну спектральну щільність) пропонується наступний спосіб пасивної ідентифікації [6]. Вхідний і вихідний сигнали об'єкту пропускають через ряд лінійних фільтрів $N = n+2$ порядку $K \ge N$ з передавальними функціями $W_i(p)$.

Будемо вважати, що $L^{-1}[W_i(p)]$ лінійно незалежні, де $L^{-1}[1,6]$ - означає зворотне перетворення Лапласа. Тоді запишемо :

$$L^{-1}[W_L(p)] \ne \sum_{J=1}^{N} C_J L^{-2}[W_J(p)], i \ne j \tag{15}$$

У результаті такої операції одержимо матрицю $y(t)$ і вектор $\overline{X}(t-\theta)$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1^{'}(t), & ....., & y_1^{(n-1)}(t) \\ y_2(t), & y_2^{'}(t), & ....., & y_2^{(n-2)}(t) \\ ... & ... & ....., & ..... \\ y_{n+2}^{1}(t), & y_{n+2}^{2}(t), & ....., & y_{n+2}^{(n+2)}(t) \end{bmatrix}, \tag{16}$$

$$\text{Де } \overline{X}(t-\theta) = (x_1(t-\theta),....,x_N(t-\theta), \tag{17}$$
$$y^{/}(t) = L^{-1}[p^i W_i(p) y(p)], \quad 0 < \theta < \tau_{\max}$$
$$x_j(t) = L^{-1}[W_J(p) x(p)], i = 0,...n, \ j = 1,...(n+2)$$

x(p), y(p) –зображення по Лапласу вхідного і вихідного сигналу об'єкту, який будемо описувати рівнянням виду (13). Доведемо, що одержані таким чином сигнали підкоряються системі тотожностей.

$$\sum_{i=0}^{n} a_i y_i^{(i)}(t) = x_i(t-\theta), \ j = 1,..., N \tag{18}$$

$$\text{за умови, що } \theta = \tau \tag{19}$$

Дійсно, якщо перейти в рівняння (13) в частотну область, що допустимо внаслідок квазістаціонарності параметрів $a(i = 0,...,n), \tau$ та помноживши дві частини на $W_j(p)$, одержимо з врахуванням (19) значення виду:

$$a_i w_j(p) * p^i y(p) = w_j(p) X(p) e^{-\theta p} \tag{20}$$

Якщо перейти у виразі (20) у частотну область і врахувати вираз (17), одержимо систему рівностей (18). Тому сигнали $y_j^i(t), X_j(t-\theta)$ будемо використовувати для визначення $a_i, \tau, i = 0,...,n.$ З цією метою введемо вектори

$$\overline{b}(t,\theta) = (b_0(t,\theta),...,b_n(t,\theta))$$
$$\overline{\epsilon}(t,\theta) = (\epsilon_1(t,\theta),...,\epsilon_n(t,\theta)) \tag{21}$$

Які будемо визначати із співвідношень:

$$b^{-T}(t,\theta) = Y^{-1}(t), G^{-T}(t-\theta), \tag{22}$$

де $\overline{G}(t-\theta) = (X_1(t-\theta), ..., X_{n+1}(t-\theta))$ (23)

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1^{/}(t), & ...., & y_1^{(m)}(t) \\ y_i(t), & y_i^{i}(t), & ...., & y_i^{n}(t) \\ ..., & ..., & ...., & ... \\ y_n(t), & y_{n+1}^{i}(t), & ...., & y_{n+1}^{n}(t) \end{bmatrix}, \tag{24}$$

$$\epsilon^{-T}(t,\theta) = b^{-T}(t,\theta) - X^{-T}(t-\theta) \tag{25}$$

При виконанні умови (15) rank $y(t) \gg n+1$, а тому $Y^{-1}(t)$ *існує*. Як слідує із виразів (22-25) (n+1) - компонента вектору $\overline{\epsilon}(t,\theta)$ тотожність, яка рівна нулю, а в той же час (n+2) компонента в загальному випадку відрізняється від нуля. Як слідує із порівнянь виразів (18) і (22) в момент, коли виконується умова (24) $\epsilon_{n+2}(t,\theta)$ компоненти вектора $\overline{\epsilon}(t,\theta)$ обнулюються. При цьому виконується умова:

$$b_j(t_1,\theta) = a_j,\ j = 0, ..., n \tag{26}$$

Утім оцінки поточних значень параметрів об'єкта можливо одержати із (22). Запропонований алгоритм можливо реалізувати на базі МП. Розглянемо приклад використання алгоритму керування в системі автоматичного регулювання процесом заморожування напівфабрикатів хліба [7]. Блок–схема такої системи наведена на рис.2. У цій системі якісний склад борошна та інгредієнтів контролюється датчиками Д2, Д3,Д4 витрати води автоматичним витратоміром 4 Сигнали з цих інтелектуальних датчиків і блока завдання через ПВВ надходять в МП1.

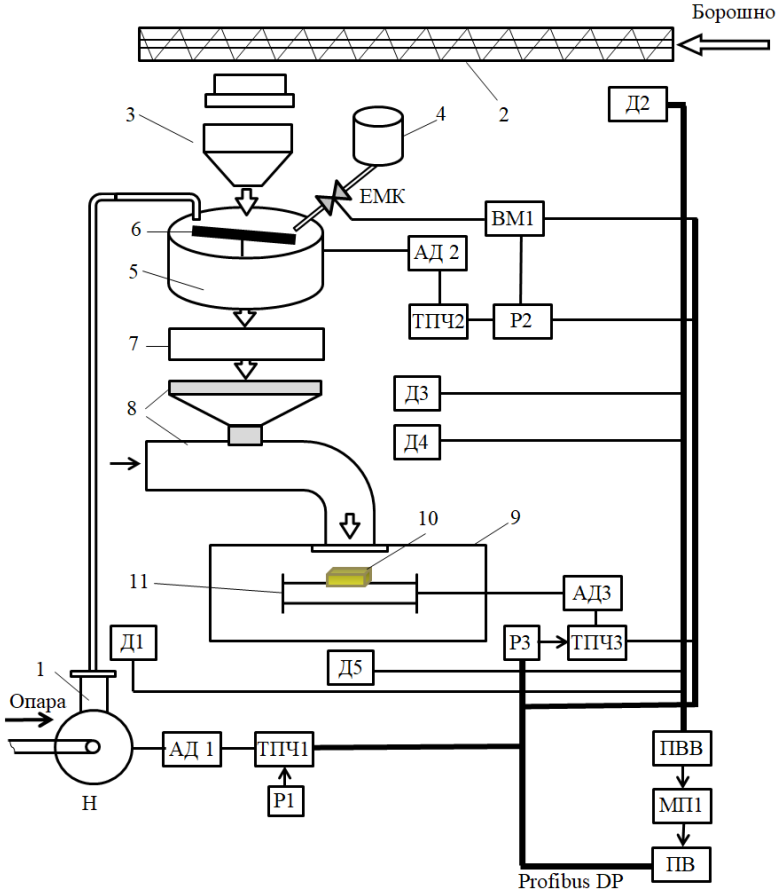


Рис. 2 – Адаптивна цифрова система керування тістомісильним відділенням:
1 – насос з електроприводом АД1–ТПЧ1; 2 – шнековий давач борошна; 3 – автоборошномірний пристрій; 4 – автоматичний водомірний бачок; 5 – тістомісильна машина; 6 – мішалка з електроприводом АД2 – ТПЧ2; 7 – п'ятисекційний бункер; 8 – робототехнологічний комплекс виробництва; 9 – холодильна камера; 10 – хліб; 11 – конвейер з електроприводом АД3–ТПЧ3.

При цьому за інформацією датчика Д3 виконується реалізація контуру адаптивного регулювання, шляхом зміни подачі води в тістомісильну машину [5]. Алгоритми управління працює наступним чином. Нехай $T_{кв}$ – інтервал квантування, який визначає дискретність вводу і виводу усіх сигналів у МП1. Тоді сигнали із датчиків Д2, Д3, Д4, Д5, $x_i^j(t), y_i^j(t)$ вводять в МП1 у дискретні моменти κT_{KB}, к=0,1,2,….,N. Величина запізнення апроксимується виразом $l * T_{KB}$, де l – приймає цілочисельне значення з діапазону:

$$0 \le l \le m, \tag{27}$$

де $m = ent[\frac{\tau_{\max}}{T_{KB}}] + 1$ —фіксоване число.

Введені в МП сигнали утворюють матрицю $Y(\kappa T_{KB})$ та вектор $\overline{y}_{n+2}(\kappa T_{KB})$, $\overline{X}(\kappa T_{KB})$, де

$$\overline{y}_{n+2}(\kappa T_{KB}) = (y_{n+2}(\kappa T_{KB}), y_{n+2}^{/}(\kappa T_{KB}), \dots, y_{n+2}^{(n)}(\kappa T_{KB})) \tag{28}$$

$\overline{x}_e(\kappa T_{KB}) = (x_1(k-e)\kappa T_{KB}, \dots, x_{n-2}(k-l)\kappa T_{KB})$, де l – змінюється в межах (27).

У процесі ідентифікації обчислюються вектори $\overline{b(\kappa T_{KB})}$ та (n+2) компоненти вектора $\overline{\epsilon}(\kappa T_{KB})$, які є дискретними аналогами виразів (22) та (23).

$$\overline{b}(\kappa T_{KB}) = Y^{-1}(\kappa T_{KB}) F * e^{-T}(\kappa T_{KB}) \tag{29}$$

$$\overline{\epsilon}_N(\kappa T_{KB}) = \overline{y}_{n+2}(\kappa T_{KB}) \square \overline{b}((\kappa T_{KB}, l) - \overline{x}_e((\kappa - l)T_{KB}) \tag{30}$$

при різних l в межах (27). Потім обчислюється l^* 1* 1* 1•, при якому функція $I(l) = |\epsilon_N(\kappa T_{KB}, l)|$ досягає максимуму. Запізнення і динамічні параметри оцінюють за формулою :

$$\tau^* = l T_{KB} \tag{31}$$

$$a_l = b_i(\kappa T_{KB}, l), i = 0, \dots, N \tag{32}$$

Після реалізації вище описаного алгоритму МП1 через буферну пам'ять і ПВ впливає на регулятор Р3 та виконавчий механізм холодильної установки 9 конвеєра 11, змінюючи його швидкість за допомогою ТПЧ3 та АД3.При цьому мікропроцесор МП1 контролює тривалість заморожування тіста τ_T та хліба τ_x і температуру в діапазоні -20°С (±0,1°С), що дозволяє адаптивним системам керування $АСК_{д.з.т.}$, $АСК_{д.з.х.}$ відпрацьовувати показники якості системи [6, 7], використовуючи вищеописані адаптивні алгоритми керування.

На рис 3 представлені результати порівняльного дослідження цифрового ПІД – закону керування (крива 1) і регулятора, який реалізує адаптивний алгоритм (крива 2) і яке виконано із застосуванням програмного забезпечення, розробленого в середовищі MATLAB [7].

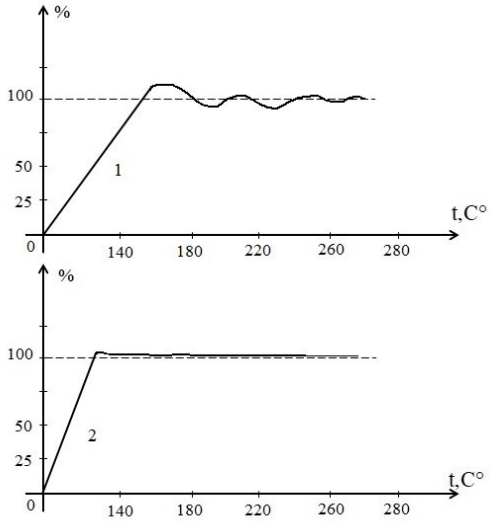


Рис. 3 – Графіки зміни в часі параметра якості тіста:
1 – ПІД-регулятор, 2 – ПІД-адаптивний регулятор.

Із аналізу кривих 1 та 2 слідує, що для САР з адаптивним законом управління час відпрацювання сигналу задавача впливу значно менше (крива 2), ніж в системі з ПІД – цифрового керування (крива 1). При цьому відмітимо, що дисперсія регулювального параметру знизилась в 2,1 рази, а час перехідного процесу зменшився на 25% у порівнянні з ПІД – цифровим керуванням.

Висновки. Теоретично доведено, що ідентифікація процесів виробництва хліба здійснюється шляхом визначення режимів роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою методів оптимізації немінімальнофазових об'єктів харчової промисловості визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє побудувати алгоритми адаптації, які адаптуються до змін параметрів об'єкту. Розроблено адаптивні системи оптимального керування процесами виробництва хлібобулочних виробів, що дозволяє підвищити якість керування цими процесами при зміні їх параметрів і режимів роботи , збуреного середовища та цілей керування. Розроблені алгоритми реалізовані за допомогою сучасних мікропроцесорних систем, які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують автоматично квазіоптимальне налагодження систем керування технологічними стадіями виробництва продуктів харчування. Встановлено, що оптимальні показники якості регулювання при виробництві хліба досягаються за допомогою адаптивних цифрових регуляторів, а саме: при використанні адаптивних цифрових регуляторів у системі керування стадіями виробництва заморожуваних сортів хліба, дисперсія регулювального параметру знизилась в 2,1 рази а час перехідного процесу зменшиться на 25% у порівнянні в ПІД-регулюванням.

Література

1. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів / В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець, А.В. Возняк, О.В. Омельченко, Д.П. Заікіна, О.К. Копайгора, А.В. Шеїна //За редакцією професора В.П. Хорольського. – Кривий Ріг: видавець ФОП Чернявський Д.О. – 2019, 204с.
2. Цифрові системи інтелектуального управління підприємствами промислового комплексу регіону / В.П. Хорольський, О.В. Хорольська, І.П. Діянов //за загальною редакцією професорів В.П. Хорольського та О.Б. Чернеги. – Кривий Ріг: видавець ФОП Чернявський Д.О. – 2020, 564с.
3. Гончаренко Б.М., Ладанюк А.П., Автоматизація виробничих процесів харчових технологій: Підручник – К.:НУХТ, 2014 – С.530
4. Швед С.М. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів / С.М.Швед, І.В.Ельперін //Східно-європейський журнал передових технологій. – 2012, №613(60) – С.44-46
5. Хроменков В.М. Технологическое оборудование хлебзаводов и макаронных фабрик / В.М. Хроменков – СпБ ГЦОРД, 2004 –С.496
6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт. 2-е изд., перераб. и доп. Т.3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ, 2004 – 784с.
7. Дорф Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р.Бишоп. Пер. С англ. Е.И.Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832с.

References

1. Intelektual′ni systemy upravlinnya vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv / V.P. Khorol′s′kyy, YU.M. Korenets′, A.V. Voznyak, O.V. Omel′chenko, D.P. Zaikina, O.K. Kopayhora, A.V. Sheyina //Za redaktsiyeyu profesora V.P. Khorol′s′koho. – Kryvyy Rih: vydavets′ FOP Chernyavs′kyy D.O. – 2019, 204s.
2. Tsyfrovi systemy intelektual′noho upravlinnya pidpryyemstvamy promyslovoho kompleksu rehionu / V.P. Khorol′s′kyy, O.V. Khorol′s′ka, I.P. Diyanov //za zahal′noyu redaktsiyeyu profesoriv V.P. Khorol′s′koho ta O.B. Chernehy. – Kryvyy Rih: vydavets′ FOP Chernyavs′kyy D.O. – 2020, 564s.
3. Honcharenko B.M., Ladanyuk A.P., Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv kharchovykh tekhnolohiy: Pidruchnyk – K.:NUKHT, 2014 – S.530
4. Shved S.M. Sistemniy analíz tekhnologíchnogo protsesu virobnitstva khlíbobulochnikh virobív / S.M.Shved, Í.V.Yel'perín //Skhídno-êvropeys'kiy zhurnal peredovikh tekhnologíy. – 2012, №613(60) – S.44-46
5. Khromenkov V.M. Tekhnologicheskoye oborudovaniye khlebzavodov i makaronnykh fabrik / V.M. Khromenkov – SpB GTSORD, 2004 –S.496
6. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 5-i tt. 2-ye izd., pererab. i dop. T.3. Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya. – M.: Izd-vo MGTU, 2004 – 784s.
7. Dorf R. Sovremennyye sistemy upravleniya / R.Dorf, R.Bishop. Per. S angl. Ye.I.Kopylova. – M.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2004. – 832s.

Надійшла / Paper received : 05.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-207-212
УДК 685.34.341

Т.М. ЛИПСЬКИЙ, Н.В. ПЕРВАЯ, А.І. БАБИЧ
Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБЛЕННЯ ВЗУТТЯ В СТИЛІ ГРАНЖ

В умовах сьогодення є доступним для усіх людей виготовлення взуття за індивідуальним замовленням. Зараз змінились життєві стандарти, тому до традиційного поняття виготовлення взуття на замовлення із-за фізіологічних потреб чи відхилень у стопах споживачів додалося виготовлення елегантного модельного, повсякденного, театрального, сценічного, обрядового взуття для усіх бажаючих, людей без патологій стоп.

У певних прошарках населення України, так званої «золотої молоді», виготовлення взуття за індивідуальним замовленням є способом життя і певним статусом, який дозволяє їм почуватись особливими. І це дійсно певною мірою так, оскільки виробник взуття підприємств великої, середньої і навіть малої потужності орієнтується на вимоги і потреби масового покупця і не може втілити бажання конкретної людини.

В статті досліджено особливості виготовлення взуття за індивідуальним замовленням.

Розроблена конструкція взуття та визначено, що шкіра Краст є найбільш придатним матеріалом для деталей верху та низу взуття в стилі гранж. Також визначені технологічні етапи його виготовлення з урахуванням технології фінішного оздоблення готових виробів за індивідуальним замовленням.

Розроблено пакет конструкторсько-технологічної документації на вироби даного сегменту.

Виготовлено зразки моделей чоловічого взуття в стилі гранж з різним колористичним фінішним оздобленням.

Перевірено, згідно вимог стандартів, і доведено експериментальним шляхом високу зносостійкість лицевої поверхні матеріалів для верху взуття, а саме Красту оздобленого фінішними композиціями і готових виробів, здатність матеріалу до багаторазового згину, розтягу, мокрого і сухого тертя.

Підтверджено високі експлуатаційні характеристики взуття.

Доведено експериментальним шляхом доцільність даних робіт.

Ключові слова: розроблення, технологія, фінішне оздоблення, шкіра Краст, зносостійкість, стиль гранж.

T. LIPSKYI, N. PERVAIA, A.BABYCH
Kyiv National University of Technology and Design

DEVELOPMENT OF GRANGE STYLE SHOES

In today's conditions it is available for all people to make shoes to order. Now living standards have changed, so the traditional concept of making shoes to order due to physiological needs or deviations in the feet of consumers added the production of elegant model, casual, theatrical, stage, ceremonial shoes for all comers, people without foot pathology.

In certain segments of the population of Ukraine, the so-called "golden youth", making shoes to order is a way of life and a certain status that allows them to feel special. And this is true to some extent, because the manufacturer of footwear enterprises of large, medium and even small capacity focuses on the requirements and needs of the mass buyer and can not fulfill the wishes of a particular person.

The article examines the features of making shoes to order.

The design of the shoes has been developed and it has been determined that Krast leather is the most suitable material for the details of the upper and lower shoes in the grunge style. The technological stages of its production are also determined, taking into account the technology of finishing of finished products by individual order.

A package of design and technological documentation for products of this segment has been developed.

Samples of models of men's shoes in grunge style with different color finishes are made.

Tested, according to the requirements of the standards, and experimentally proved the high wear resistance of the front surface of the materials for the upper of the shoe, namely the crust decorated with finishing compositions and finished products, the ability of the material to repeated bending, stretching, wet and dry friction.

High performance characteristics of footwear are confirmed.

The expediency of these works is proved experimentally.

Key words: development, technology, finishing, Krast leather, wear resistance, grunge style.

Вступ

Сучасна мода настільки багатогранна, що іноді важко зрозуміти, хто перед тобою – жебрак, безпритульний або неймовірно модний тусовщик. Якщо є сумніви, дивлячись на людину, яка, загалом, зовсім не схожа на безпритульного, будьте впевнені – він одягнений в стилі гранж.

Гранж увірвався в світ моди блискавично, зносячи на своєму шляху всі канони, традиції, химерність і звичні тенденції. Національна приналежність або вік для нього не має ніяких обмежень. Бути собою – це основне завдання.

Стиль гранж вперше з'явився в Америці 70-х років в колі нової субкультури. Її учасники, виступаючи проти матеріальних надмірностей і висловлюючи свої погляди на життя, самотність і депресивний настрій, «йшли в музику» – альтернативний рок. У навушниках хлопців грали треки таких відомих виконавців як Nirvana, Pearl Jam, Alicein Chains.

XX століття, взагалі, характеризується як епоха пошуку в усьому: поети знаходили нові рими, а художники, наприклад, теми для своїх робіт. Серед творчої молоді стався бунт світогляду, ціла революція загальноприйнятих поглядів. Вони заперечували сприйняття одягу як чогось головного в людині. На перший план виносився внутрішній світ, в якому немає, і ніколи не буде, місця для гламуру [1].

Всю суть стилю гранж можна описати як: змішування непоєднуваних елементів; комфорт і зручність на першому місці; байдужість до моди. Американський дизайнер Марк Джейкобс, який створював речі в стилі гранж казав: «Мода – питання грошей, стиль – питання індивідуальності» [2].

Досягти стилю гранж в одязі можливо за рахунок змішування непоєднуваних елементів гардеробу, а здійснити це у взутті значно складніше. Одним із варіантів може бути виготовлення взуття за індивідуальним замовленням.

Виробництво взуття за індивідуальним замовленням дає можливість фахівцю творити використовуючи типові і не типові матеріали, класичні та удосконалені власноруч методи і методики моделювання, технології складання деталей у виріб, а також дозволяє експериментувати з фінішними композиціями для оздоблення і досягати не просто бажаного, але й практично унікального результату.

Потрібно відмітити той факт, що виробництво взуття за індивідуальним замовленням стає дедалі популярнішим у світі, про що свідчать щорічні професійні виставки.

Постановка завдання

Сучасна мода достатньо демократична, широкий спектр можливостей сучасної людини і різноманітність трендів дозволяє створювати дизайнерам модні образи в будь-якому стилі. Молодь, наповнена бунтарським духом, духом неповторності і протесту суспільству, на противагу гламурному SWAG і розумній повсякденності Smart Casual може обрати для себе не менш яскравий, але більш зухвалий та індивідуальний Grunge.

До основних характерних рис взуття в стилі гранж відносять: вільний крій, асексуальність, явна «поношеність» та «подертість», «рвана» і «викривлена» структура матеріалу та виробу, «вицвілий» колір матеріалу, вінтажність, багатошаровість, застосування слоганів, малюнків тощо.

Реалізувати стиль гранж у взутті можливо при індивідуальному замовленні за рахунок застосування специфічних підходів до фінішного оздоблення або декорування, нетрадиційного конструктивного рішення дизайнера та інноваційних технологічних підходів щодо складання деталей у виріб. Найбільш прийнятним матеріалом для верху взуття в стилі гранж є натуральна шкіра Краст, яка відноситься до шкір з натуральною лицьовою поверхнею, для яких не було проведене механічне облагороджування (шліфування, тиснення тощо). Зазвичай, Краст виробниками взуття підбирається нефарбований, що дає можливість створення на його поверхні індивідуального кольору або ефекту. Краст, застосовуваний для виготовлення взуття, фарбується вручну і переважно вже у готовому виробі. Для надання взуттю кольору використовують спеціальні композиції (так звані колоранти) або готові фінішні композиції на водній або безводній (органічній) основі. Залежно від основних характеристик застосовуваних барвників Красту надають специфічних властивостей: яскравого або нетрадиційного кольору, ефекту потертості або патини, металічного блиску тощо. Вказані композиції використовують не у промисловому масштабі, а для ремісництва та штучної обробки.

Фінішні композиції для оздоблення шкіри Краст або виробів з неї є, зазвичай, імпортними матеріалами, стислий перелік властивостей яких надає виробник у технічній документації [3-6, 7-9]. Перелік включає вид шкіри, яку можна фарбувати даним продуктом, колір і глибину проникнення композиції в структуру матеріалу, вказуються також специфічні властивості, що надає композиція шкірі (наприклад, воскова поверхня, водовідштовхувальні властивості, глянець, металічний блиск, перламутр тощо).

Таким чином, основною метою даної роботи є створення взуття у стилі гранж за рахунок розробки оригінальної конструкції, технології складання взуття та застосування фінішного оздоблення готового виробу.

Для досягнення мети роботи необхідно дослідити тенденції моди і попиту на взуття в умовах сучасних професійних виставкових центрів, виявити потреби споживачів і думки професіоналів щодо придбання виробів даного стильового сегменту, обґрунтувати споживчі потреби у формуванні сучасного асортименту,розробити конструкції взуття у стилі гранж, удосконалити етапи і технологічні процеси виробництва взуття.

Основна частина

В результаті аналізу сучасних напрямків моди та думок професіоналів і споживачів, отриманих на основі проведеного анкетування за критеріями вагомості в умовах міжнародної виставки «Leather and shoes», м. Київ (рис. 1), за підтримки ТОВ «Litini», була розроблена асортиментна серія чоловічих черевиків для повсякденного носіння у стилі гранж бренду «T. Lipskyi».

Розроблені дослідні зразки моделі виробу з фінішним оздобленням (рис. 2) за удосконаленою автором технологією виготовлення і фінішного оздоблення готових виробів [10, 11]. Візуалізація технологічних етапів виготовлення та фінішного оздоблення взуття за індивідуальним замовленням в стилі гранж представлена на рис. 3 (а-ж).

Матеріали з фінішним оздобленням згідно загальновідомої методики (за в ISO 17075 *(ГОСТ* 4.11-81 «Система показників якості продукції») вибрано найбільш вагомі показники і проведено дослідження) [12-17] піддавались експериментальним випробуванням на фізико – механічні властивості фінішного покриття, а готове взуття піддавалось дослідному носінню (за методикою ДСТУ EN ISO 20344: 2009) для перевірки і підтвердження високих експлуатаційних властивостей виробу[18].

Для вивчення попиту щодо розробленого взуття в стилі гранж було проведено анкетування учасників професійної виставки «Leather and shoes – 2020», яких представляли виробничники та споживачі взуття. Визначено п’ять критерії вагомості, які впливають на вибір споживача, а саме: зовнішній вигляд

(дизайн), ціна на виріб, вага виробу, матеріали, комфортність моделі. Опитування показало, що представлені моделі взуття даного стилю є цікавими, усі їх охоче розглядали, однак не всі з анкетованих осіб наважились би їх носити – 34%, охоче носили б, але не знають де купити – 46%, не носили б ніколи – 8%, не визначились – 12%. Всі респонденти зазначили щодо практичності та різноманітності оздоблення взуття фінішними композиціями, можливості оновлення кольору або його часткової чи повної зміни. Виробничниками одностайно було відмічено сучасність і трендовість моделей, однак, було зазначено, що для серійного виробництва представлені моделі не підходять. Це пов'язано з тим, що взуття виготовляється зі шкіра Краст, яка потребує обов'язкового фарбування та фінішного оздоблення у готовому виробі для надання необхідних функціонально-споживчих та естетичних характеристик, а також якість виконання оздоблення залежить від професіоналізму майстра. Тому необхідно більш глибоко займатися питанням удосконалення технології фінішного оздоблення взуття зі шкіри Краст.

Рис. 1. Розподіл пріоритетів споживчих переваг при оцінці чоловічого взуття

В залежності від матеріалу підкладки та конструктивних особливостей виробу, розроблену модель взуття можна експлуатувати в різні періоди календарного року, про що свідчать позитивні результати дослідного носіння.

а **б**

в **г**

Рис.2. Розроблений зразок черевиків чоловічих для повсякденного носіння в стилі гранж
а – вид збоку; б – вид спереду; в – вид з заду; г – вид знизу

Для виготовлення дослідних зразків чоловічих черевиків в стилі гранж використано тільки натуральні матеріали: для верху взуття – шкіра Краст з сировини великої рогатої худоби (ВРХ); для підкладки – шкіра для підкладки взуття; для деталей низу взуття – шкіра Краст для низу взуття з чепрака ВРХ; нитки для складання заготовки та шнурівка виготовлені з бавовняного волокна. До підошви взуття для носіння у період «осінь-зима», може додатково додаватися комплект підошви з поруватої гуми чи поліуретану (ПУ), який за бажанням покупця прикріплюють до основної підошви для підвищення її зносостійкості під час виробництва або під час ремонту взуття. Метод кріплення низу взуття клеє-прошивний. Черевики розроблялися і виготовлялися в умовах дизайн студії і технологічної лабораторії ТОВ «Litini».

Для визначення якості і експлуатаційних характеристик взуття було відібрано 5 зразків взуття і зразки матеріалу та проведено оцінку їх параметрів за такими показникам: стійкість покриття до багаторазового вигину; стійкість покриття до тертя (мокрого, сухого); стійкість забарвлення до тертя (мокрого, сухого); стійкість забарвлення до дії органічного розчинника [12-18]. Результати випробувань представлено в таблиці 1.

Рис.3 Візуалізація етапів технології виготовлення та фінішного оздоблення взуття за індивідуальним замовленням в стилі гранж
а – початковий етап (не оброблена заготовка з Красту); б – перший етап (зволоження, затягування заготовки на колодку, сушка); в – другий етап (знежирення заготовки мильним розчином, промивання, сушка); г, д – третій етап (нанесення фінішу 6 шарів, пошарова сушка); е – четвертий етап (вощіння) ; є– п'ятий етап (полірування) ; ж- готове взуття.

Отже, за результатами випробувань зрозуміло, що покриття яким оздоблено взуття з Красту має високу якість. Згідно стандартів оздоблення вважається стійким до сухого тертя якщо зразок шкіри витримує 200 обертів без пошкодження покриття, до мокрого – 100 обертів. Запропоновані автором для використання фінішні композиції надали Красту більшої стійкості ніж вимагає нормативна документація на шкіри для верху взуття. При визначенні стійкості покриття до багаторазового вигину відзначають кількість вигинів (циклів) до появи утворення тріщин та зміни кольору, складки, осипання покриття. Всі зразки оздобленого Красту витримали більше 50000 вигинів без втрати цілісності покриття, його розтріскування та осипання, а це є відмінним результатом. Визначити міцність прилипання покриття до поверхні

шкіри(адгезію) і товщину покриття на шкірі ваговим методом виявилось в даному дослідженні неможливо, оскільки на поверхні шкіри Краст фінішними композиціями не було сформовано плівку. Фінішні композиції швидко дифундують у структуру шкіри не утворюючи на її поверхні видимого покриття. Але слід відмітити і високі адгезійні властивості композицій до будь – якого матеріалу, використаного в дослідженні (скла, порцеляни, алюмінію тощо).

Таблиця 1

Основні показники шкіри Краст, оздобленої фінішними композиціями

Показник	Стандартизований показник за ДСТУ	Фінішна композиція за кольором		
		зеленого (Kenda Farben Spa)	синього (IEXI s.r.l)	червоно-коричневого (Biar)
Стійкість покриття до багаторазового вигину, вигини	50000	> 50000	> 50000	> 50000
Стійкість покриття до тертя, оберти:				
сухого	200	> 500	> 500	> 500
мокрого	100	> 500	200	150
Стійкість забарвлення до тертя, бали:				
сухого	2 – 5	5	5	4
мокрого	2 – 5	5	4	3
Стійкість забарвлення до дії органічного розчинника, бали	2 – 5	4	4	2

Зважаючи на особливості догляду за взуттям, визначено також стійкість забарвлення поверхні оздобленої шкіри до тертя та дії органічних розчинників. Стійкість, оцінена в балах за шкалою сірих еталонів, є максимальною (5 балів) для сухого тертя у всіх зразків. Стійкість забарвлення до дії органічних розчинників у шкір для верху взуття рідко досягає високих показників. Більшість органічних розчинників розчиняють оздоблювальні матеріали, змиваючи їх з поверхні шкіри. Саме тому вказаний показник не нормується для взуттєвих шкір. Проведене дослідження виявило достатньо високу стійкість (4 бали) до дії чотирихлористого вуглецю зразків зеленого та синього кольорів, що також можна пояснити специфічним складом цих композицій – композиція зеленого кольору є за характеристиками виробника лаком, а в композиції синього кольору міститься віск.

Визначення фізико-механічних показників оздобленого Красту, виявило збільшення показника границі міцності під час розтягування та зменшення подовження зразка під час напруження у порівнянні з Крастом без оздоблення (табл. 2.).

Таблиця 2

Фізико-механічні показники Красту, оздобленого фінішними композиціями

Показник	Краст, оздоблений фінішною композицією			Краст без оздоблення
	зеленою	синьою	червоно-коричневою	
Границя міцності під час розтягування, 10 МПа	2,1	1,7	1,65	1,5
Подовження під час напруження 10 МПа, %	22	34	36	40

Досягнення повної покривності Красту фінішними композиціями вплинуло на його еластичність. Найбільшої зміни зазнав Краст, оздоблений зеленою композицією, яка за 6 проходів нанесення повністю просочила дерму по товщині, зменшивши еластичність. При цьому на 40 % збільшилась міцність Красту, а видовження під час напруження у 10 МПа зменшилось на 45 %. Скоріше за все, такі відчутні зміни обумовлені органічною природою композиції і її жорсткою полімеризацією в структурі Красту.

У випадку використання композицій синього та червоно-коричневого кольорів зміни не такі суттєві. У порівнянні з показниками Красту до оздоблення, границя міцності під час розтягування у випадку застосування композиції синього кольору збільшується на 13,3 %, червоно-коричневого – 10,0 %. Подовження під час напруження у 10 МПа у випадку застосування композиції синього кольору збільшується на 15,0 %, червоно-коричневого – 12,5 %. Отримані дані дають змогу оцінити, як зміняться механічні показники Красту за умови нанесення фінішних композицій до повної його покривності. На що слід звернути уваги при використанні згаданих композицій.

Висновки

На сьогоднішній день виробництво взуття в стилі гранж є актуальним і затребуваним, але можливо тільки за індивідуального замовлення при застосуванні фінішних композицій для оздоблення готового виробу зі шкіри Краст.

Застосування фінішних композицій для оздоблення готового взуття з Красту є пріоритетним напрямом розвитку виробництва, оскільки розширює можливості і зменшує витрати на матеріали, що в цілому здешевлює вартість виробу не погіршуючи його естетичних, ергономічних, технологічних і гігієнічних характеристик.

Використання фінішних композицій для оздоблення взуття зі шкіри Краст дає змогу отримати покриття високої якості. Ефективність підтверджується високою стійкістю отриманого покриття до механічного впливу, дії води та органічних розчинників.

Результати дослідного носіння розроблених чоловічих черевиків в стилі гранж показали позитивні результати та отримали схвальні відгуки споживачів.

Література

1. https://www.miraton.ua/fashioncocktail/derzkiy-stil-granzh-bunt-protiv-glamura-ili-trend-sezona.html
2. Марк Джейкобс о гранже http://www.lookatme.ru/flow/posts/fashion-radar/85081-granzh
3. KENDAFARBENSpa. http://www.kendafarben.it/.
4. Biar.it. URL :http://biar.it/homy/?lang=en.
5. IEXIs.r.l. URL :http://www.iexi.com/guest/en/home.
6. АТК. https://atk.kiev.ua/g22111750-kraski-finishi-iexi.
7. T. Lipskyi, N. Pervaia, O. Okhmat, O. Mokrousova, A. Babych. Assessment of performance using compositions in crust leather decoration. Eastern-European journal of enterprise technologies ISSN 1729-3774, Том 6,№1/6 (109) 2021, 57-63 (2021): DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224226
8. Гаркавенко С.С., Бабич А.І., Охмат О.А., Липський Т.М. Дослідження показників якості композицій для оздоблювання шкіряного напівфабрикату Краст. Вісник Хмельницького національного університету.Технічні науки. 2020. № 5. С. 117 – 126.
9. Данилкович А.Г., Грищенко І.М., Ліщук В.І. Інноваційні технології виробництва шкіряних хутрових матеріалів та виробів : монографія / А. Г. Данилкович, І. М. Грищенко, В. І. Ліщук [та ін.].. – К.: Фенікс, 2012. - 344 с.
10. Андреєва О.А., Грищенко І.М., Зварич І.Т. Особливості шкірянохутрової сировини : монографія. – Україна, К.: Світ успіху. – 2018. – 451 с.
11. Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги: ДСТУ 4239-2003 – [Чинний від 01-10-2004]. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с.
12. ISO 17075 *(ГОСТ* 4.11-81 «Система показників якості продукції») вибрано найбільш вагомі показники і проведено дослідження. – [Чинний від 2012-01-01] – К. : Держспоживстандарт України 2012.– 12 с. – (Національний стандарт України).
13. ДСТУ ISO 5404:2007 Шкіра. Фізико-механічні випробування.
14. ГОСТ 938.11 Кожа. Метод испытания на растяжение.
15. ГОСТ 13868 Кожахромовая для верха обуви. Метод определения устойчивости покрытия к многократному изгибу.
16. ГОСТ 939 Кожа для верха обуви. Технические условия.
17. ГОСТ 938.29 Кожа. Метод испитания устойчивости окраски к сухому и мокрому трению.
18. Засоби індивідуального захисту. Взуття побутового призначення. Технічні умови (EN ISO 20345:2004/AC:2007/A1:2007, IDT) : ДСТУ EN ISO 20345:2009. – [Чинний від 2012-01-01] – К. : Держспоживстандарт України 2012.– 11 с. – (Національний стандарт України).

References

1. https://www.miraton.ua/fashioncocktail/derzkiy-stil-granzh-bunt-protiv-glamura-ili-trend-sezona.html
2. Mark Jacobs on grunge http://www.lookatme.ru/flow/posts/fashion-radar/85081-granzh
3. KENDAFARBENSpa. http://www.kendafarben.it/.
4. Biar.it. URL: http: //biar.it/homy/? Lang = en.
5. IEXIs.r.l. URL: http: //www.iexi.com/guest/en/home.
6. ATC. https://atk.kiev.ua/g22111750-kraski-finishi-iexi.
7. T. Lipskyi, N. Pervaia, O. Okhmat, O. Mokrousova, A. Babych. Assessment of performance using compositions in crust leather decoration. Eastern-European journal of enterprise technologies ISSN 1729-3774, Volume 6, Page 6/1 (109), 2021, 57-63 (2021): DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224226
8. Garkavenko SS, Babych AI, Okhmat OA, Lipsky TM Research of quality indicators of compositions for finishing of leather semi-finished product Krast. Bulletin of Khmelnytsky National University.Technical sciences. 2020. № 5. S. 117 - 126.
9. Danilkovich AG, Grishchenko IM, Lishchuk VI Innovative technologies of production of leather fur materials and products: monograph / AG Danylkovych, IM Grishchenko, VI Lishchuk [etc.] .. - K .: Phoenix, 2012. - 344 p.
10. Andreeva OA, Grishchenko IM, Zvarych IT Features of leather and fur raw materials: monograph. - Ukraine, K .: The world of success. - 2018. - 451 p.
11. Textile and leather materials and household products. Basic hygienic requirements: DSTU 4239-2003 - [Effective from 01-10-2004]. - Kyiv: DerzhspozhyvstandartUkrainy, 2004. - 24 p.
12. Personal protective equipment. Household shoes. Technical conditions (EN ISO 20345: 2004 / AC: 2007 / A1: 2007, IDT): DSTU EN ISO 20345: 2009. - [Effective from 2012-01-01] - К.:ДержспоживстандартУкраїни2012.– 11 с. - (National standard of Ukraine).
13. DSTU ISO 5404: 2007 Leather. Physico-mechanical tests.
14. GOST 938.11 Leather.Tensile test method.
15. GOST 13868 Chrome leather for shoe uppers. Method for determining the resistance of the coating to repeated bending.
16. GOST 939 Leather for shoe uppers. Technicalconditions.
17. GOST 938.29 Leather.Method of testing the resistance of paint to dry and wet friction.

Надійшла / Paper received : 15.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-213-218
УДК 685.2

Н.М. БОРЩЕВСЬКА, Н.В. ПЕРВАЯ, М.В. ІВАСЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТУРНОГО НАНЕСЕННЯ ДЕКОРАТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ВИРОБИ ЗІ ШКІРИ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Удосконалення способу контурного нанесення декоративних елементів на натуральну шкіру за допомогою лазеру, визначення технологічних параметрів лазерного гравірування та експлуатаційних характеристик виробів зі шкіри, оздоблених декоративними елементами.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження базуються на основних положеннях технології взуттєвого та шкіргалантарейного виробництва. При проведенні експериментальних досліджень щодо визначення якості оздоблення шкіри комбінованим способом застосовано методи попарного порівняння, визначення стійкості покриття до сухого тертя та багаторазового вигину.

Вибір технологічних режимів нанесення контурів декоративних елементів з використанням лазерного устаткування показав на можливість застосування більш ресурсоощадних параметрів (глибина випалювання 0,1 мм, потужність променю 11 Вт), не погіршуючи якості нанесення контуру декоративного елементу лазерним устаткуванням. Оцінювання якості виконання оздоблення виробу зі шкіри способом контурного нанесення декоративних елементів показало, що вісім шарів акрилової фарби, забезпечують естетичний вигляд виробу та високу стійкість покриття до багаторазового згину (4 бали, що відповідає максимальному значенню за ДСТУ 2726-94) та сухого тертя (витримує 200 обертів без пошкодження покриття).

Запропоновано комбінований спосіб нанесення декоративних елементів на вироби зі шкіри з метою підвищення естетичних властивостей виробів.

Запропоновано для оздоблення виробів зі шкіри застосовувати удосконалену технологію нанесення декоративних елементів з використанням лазерного устаткування.

Ключові слова: лазерне гравірування, оздоблення, контурний спосіб, вироби з натуральної шкіри, декор, взуття, шкіргалантерейні вироби.

N.M. BORSHCHEVSKA, N.V. PERVAIA, M.V. IVASENKO
Kyiv National University of Technologies and Design

IMPROVEMENT OF LEATHER PRODUCTS DECORATIVE ELEMENTS CONTOUR APPLICATION TECHNOLOGY IN THE MASS PRODUCTION

In the conditions of the strengthened competition and a large number of the imported goods new technological decisions in the course of manufacturing of products from leather are key for increase of competitiveness of the goods in the market. Involvement of modern technologies at different stages of manufacturing and finishing of leather products allows you to create a unique product design.

Improving the contour application method of decorative elements on genuine leather with a laser, determination of technological parameters of laser engraving application and operational characteristics of leather products decorated with decorative elements.

The conducted theoretical and experimental researches based on the basic provisions of technology of footwear and leather accessories production. When conducting experimental studies to determine the quality of leather finishing in a combined way, the method of pairwise comparison, determination of the resistance of the coating to dry friction and repeated bending used.

The choice of technological modes of contouring decorative elements using laser equipment showed the possibility of applying more resource-saving parameters (firing depth 0.1 mm, beam power 11 W) without compromising the quality of contouring the decorative element with laser equipment. Evaluation of the leather product quality by contouring decorative elements showed that eight layers of acrylic paint provide an aesthetic appearance of the product and high resistance of the coating to repeated bending (4 points, which corresponds to the maximum value according to DSTU 2726-94) and dry friction (200 rpm without damaging the coating)

A combined method of applying decorative elements on leather products in order to improve the aesthetic properties of products is proposed.

It is offered to apply the advanced technology of drawing of decorative elements with use of the laser equipment for furnish of leather products.

Key words: laser engraving, finishing, contour method, leather products, decor, footwear, leather accessories.

Вступ. В умовах посиленої конкуренції та великої кількості імпортованих товарів нові технологічні рішення в процесі виготовлення виробів зі шкіри є ключовими для підвищення конкурентоспроможності товарів на ринку. Залучення сучасних технологій на різних етапах виготовлення та оздоблення виробів зі шкіри дозволяє створити унікальний дизайн виробів.

Лазерне високоточне устаткування активно використовується для виконання складних технологічних операцій розкрою та оздоблення взуття та шкіргалантерейних виробів. Завдяки специфічним властивостям лазерного випромінювання електромагнітна енергія може бути значно локалізована, що дозволяє контрольовано видаляти мікроскопічні обсяги матеріла і в такий спосіб виконувати прецизійну обробку. Можливо одержувати мікроотвори у різних матеріалах незалежно від їхніх властивостей.

В умовах серійного виробництва для оздоблення використовуються різні способи декорування (лазерне гравірування, різьблення, розпис фарбами тощо), але основною задачею залишається – підвищення естетичних властивостей виробів та забезпечення високої якості [1]. Кастомізація виробів передбачає індивідуальний підхід до декорування, але й серійне виробництво все частіше використовує розпис фарбами

як спосіб оздоблення. Комбінування сучасних видів декоративного оздоблення дає можливість підвищити конкурентоспроможність виробів, урізноманітнити їхнє композиційно-конструктивне рішення, зробити образ споживача ексклюзивним і неповторним.

Тому метою даної роботи є розробка способу контурного нанесення декоративних елементів на деталі/вироби з натуральної шкіри за допомогою технології лазерного гравірування та художнього розпису фарбами.

Для досягнення поставленої мети вирішувались задачі:

- аналіз методу лазерного нанесення малюнка на натуральну шкіру;
- визначення технологічних параметрів лазерного гравірування для контурного нанесення декоративних елементів;
- створення виробів з натуральної шкіри для подальшого оздоблення декоративних елементів за допомогою комбінованого нанесення малюнку;
- визначення раціональної кількості шарів фарби для заповнення площі декоративного елементу;
- оцінювання якості оздоблюваного виробу комбінованим способом контурного нанесення декоративних елементів.

Методи дослідження. Для визначення раціональної кількості шарів фарби щодо заповнення декоративного елементу використовували метод попарних порівнянь, який заснований на попарному порівняні альтернатив та виборі найкращої з них. Оцінювання якості оздоблювання декоративного елементу на шкірі проводили після кондиціювання зразків [2]. Дослідження передбачали визначення стійкості покриття до сухого тертя та багаторазового вигину [3].

Результати досліджень. У процесі виробництва виробів зі шкіри оздоблення посідає одне з центральних місць, визначаючи зовнішній вигляд виробів та естетичні якості. Нанесення елементів декору на деталі або на готові вироби зазвичай виконується вручну та потребує високої художньої підготовки фахівця [4]. Процес контурного або трафаретного нанесення декоративних елементів включає ряд підготовчих етапів: створення макету декору, його нанесення на поверхню деталі/виробу та безпосередньо розпис фарбами. В умовах серійного виробництва така технологія дає значну похибку при перенесенні декоративного елементу на об’єкт , що негативно впливає на якість виробів в цілому. Задля максимальної уніфікації процесу декорування виробів запропоновано комбінований спосіб контурного нанесення декору із залученням лазерного устаткування (рис.1).

Використання лазерного устаткування дозволяє застосовувати нетипові способи оздоблення. Процес видалення або випалення верхнього шару поверхні, яка гравіюється під дією лазерного променя, виконується з урахуванням певних технологічних параметрів, пропалюючи його на задану глибину і ширину (табл.1). При дії лазера на структуру матеріалу можлива зміна кольору, а при підвищенні потужності – прорізання тонкого матеріалу наскрізь.

Рис.1. Лазерне устаткування JL-K20W

Таблиця 1

Основні технологічні параметри лазерного гравірування

Вид гравірування	Товщина матеріалу, мм	Швидкість головки лазера, мм/с	Потужність променю, Вт	Глибина випалення, мм
Поверхневе	1,1	300	17	0,2–0,3
Середнє	1,1	300	28	0,5–0,6
Глибоке	1,1	300	60	1,1

Виявлено, що лазерний промінь прорізає різні матеріали, роблячи при цьому акуратні зрізи зі складним профілем. Для цього використовують лазери, які дають високу послідовність імпульсів або генеруючу енергію безперервно [5]. Необхідна потужність устаткування в цьому випадку залежить від матеріалу та його товщини. Сам процес виконання є автоматизованим, в ньому відсутні будь-які проміжні технологічні етапи та ручні процеси, завдяки чому максимально зменшується кількість помилок у технологічному процесі.

Для отримання контуру декоративного елементу на поверхні деталі виробу достатньо обрати налаштування лазерної установки, що відповідають поверхневому гравіруванню. Глибина випалення верхнього шару натуральної шкіри при поверхневому гравіруванні незначна 0,2–0,3 мм. Якщо гравірування є проміжним етапом для оздоблення (художнього розпису) площі декоративного елементу, то пропонується зменшити глибину випалення до 0,1 мм з метою ресурсоощадності устаткування та зменшення енерговитрат, при цьому контур декоративного елементу залишається чітким і дозволяє з легкістю виконувати розпис фарбою згідно з макетом-еталоном.

Для отримання чіткого зображення на поверхні деталі/виробу необхідна якісна підготовка декоративного елементу. Малюнок створюється в графічному редакторі векторної графіки CorelDraw, який працює сумісно з лазерним устаткуванням, та переводиться в зрозумілі устаткуванню команди. Векторне зображення з легкістю можна розділити на окремі елементи, лінії або групи фігур, та редагувати кожен елемент окремо (рис.2).

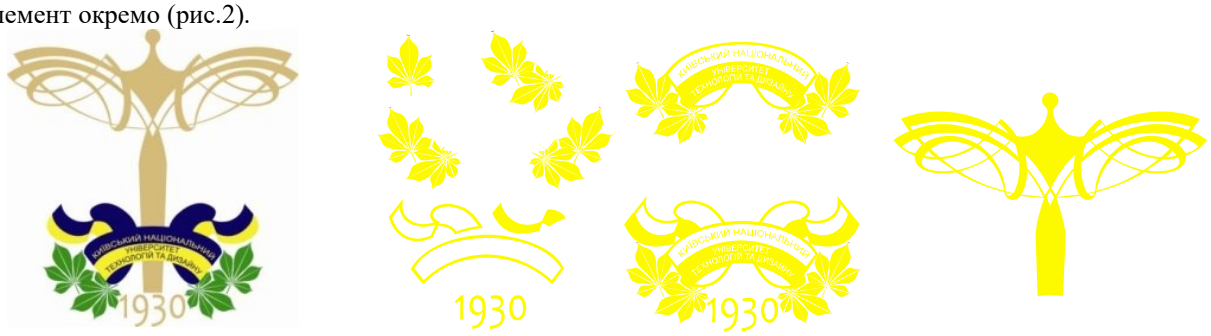


Рис.2. Трансформація художнього зображення у елементи векторної графіки

Отримане векторне зображення декоративного елементу розташовується на деталях виробу відповідно до задуму дизайнера (рис.3).

Рис. 3. Розташування векторного зображення на деталі виробу

Технологія лазерного гравірування дозволяє, не фіксуючи деталь або виріб, наносити контур ще на етапі розкрою, виконуючи чіткі малюнки з високим ступенем деталізації.

Для випробування технології контурного нанесення декоративних елементів було розроблено модель жіночої повсякденної сумки зі шкіри Краст, корпус якої складається з двох стінок, напівколового ботана та клапана, на якому розміщується декоративний елемент [6]. На рисунку 4 надано ескіз та контрольно-складальне креслення сумки, визначенні контури основних та допоміжних деталей, технологічні припуски згідно з технологічним процесом складання виробу.

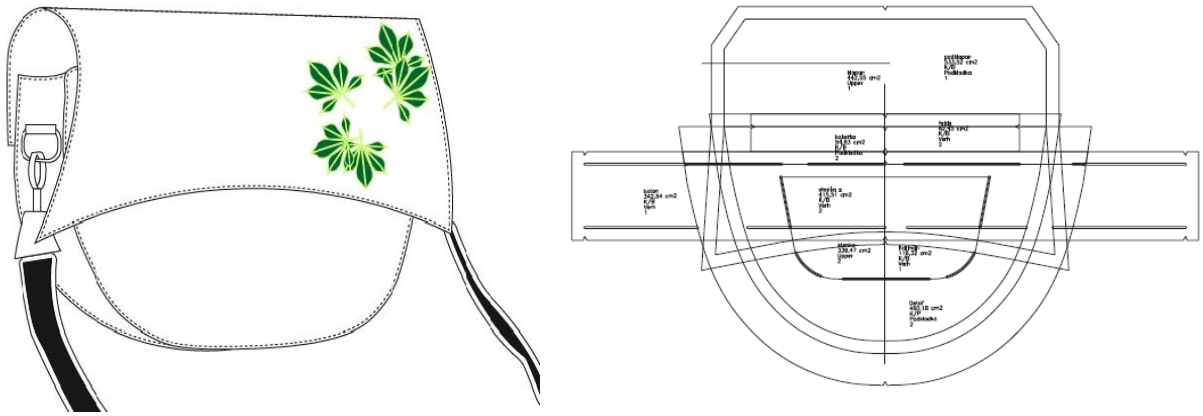


Рис.4. Ескіз та контрольно-складальне креслення жіночої сумки

Контур зображення, отриманий лазерним гравіруванням на поверхні деталі/виробу, дозволяє оздобити його розписом акриловими фарбами. Процес оздоблення акриловими фарбами декоративного елементу на натуральній шкірі дає можливість отримати покриття з високими показниками термостійкості та стійкості до багаторазового згину, сухого та мокрого тертя [7; 8]. Площа декоративного елементу заповнюється шаром акрилової фарби у відповідності до кольорової гами макету-еталону. Кількість шарів фарби залежить від різних чинників, а саме якості фарби, виду та кольору поверхні деталі виробу та інше.

Для оцінювання якості покриття декоративного елементу акриловими фарбами використовується метод попарних порівнянь, який заснований на попарному порівняні альтернатив. Для кожної пари альтернатив експерт вказує, яка альтернатива краща. Результат якості визначається алгоритмом Сааті [9].

Способом попарного аналізу порівнюємо 10 зразків з метою визначення раціональної кількості шарів фарби, що заповнюють площу декоративного елементу, контур якого нанесено лазерним гравіруванням на шкіру Краст. Для цього застосовуємо органолептичне оцінювання якості шарів фарби за їх покривною здатністю та станом лицьової поверхні, на підставі чого зроблено висновок про якість покриву фарбою площі декоративного елементу.

Таблиця 2

Матриця попарного порівняння

Кількість альтернатив / Кількість зразків	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	1	1/3	1/5	1/7	1/5	1/7	1/9	1/9	1/9	1/9
A2	3	1	1/3	1/5	1/3	1/5	1/9	1/9	1/9	1/9
A3	5	3	1	3	5	1/5	1/7	1/9	1/7	1/9
A4	7	5	1/3	1	3	1/3	1/7	1/9	1/9	1/9
A5	5	3	1/5	1/3	1	1/9	1/7	1/7	1/9	1/9
A6	7	5	5	3	9	1	1/3	1/7	1/9	1/9
A7	9	9	7	7	7	3	1	3	5	3
A8	9	9	9	9	7	7	1/3	1	3	3
A9	9	9	7	9	9	9	1/5	1/3	1	1/3
A10	9	9	9	9	9	9	1/3	1/3	3	1

Xij	Значення
1	І-я и j-я альтернативи приблизно рівноціні
3	І-я альтернатива дещо відрізняється j-й
5	І-я альтернатива відрізняється j-й
7	І-я альтернатива значно відрізняється j-й
9	І-я альтернатива явно відрізняється j-й

Знаходимо найкращу альтернативу для подальшого оздоблення:

$$V_i = \frac{C_i}{C}, \quad (1)$$

де i=1,….., N

C_i – середнє геометричне рядка матриці;

C – сума середніх значень рядків матриці порівнянь.

Результати щодо визначення найкращої альтернативи серед 10 зразків представлені на рисунку 5.

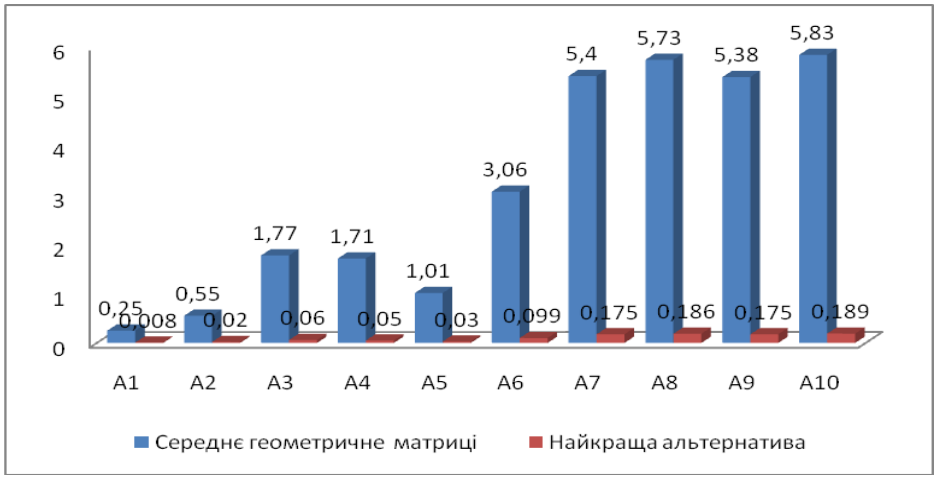


Рис.5. Діаграма рангів альтернатив щодо визначення раціональної кількості шарів фарби методом попарних порівнянь

З урахуванням величини випадкової узгодженості СлС = 1,49 (для N=10) можливо зробити висновок, що для найкращого результату кількість шарів фарби повинна дорівнювати або бути більшою семи. Враховуючи результати порівняння найкращих альтернатив A7=A9<A8<A10 визначено, що оптимальна кількість шарів фарби дорівнює восьми та забезпечує раціональне використання ресурсів і зменшує трудомісткість процесу, скорочує час для оздоблення виробу.

Для визначення якості виконання оздоблення виробу способом контурного нанесення декоративних елементів запропоновано провести експериментальні дослідження експлуатаційних характеристик виробів зі шкіри, які описуються показниками стійкості покриття до багаторазового згину та сухого тертя. Для цього було підготовлено 10 зразків зі шкіри Краст, на кожному з яких попередньо нанесли контур декоративного елементу та заповнили його площу від 1 до 10 шарами акрилової фарби.

Стійкість покриття на шкірі до сухого тертя визначали на приладі ІПК-1, що передбачає стирання лицьової поверхні зразка до появи дефектів покриття. Оздоблення вважається стійким до сухого тертя якщо зразок шкіри витримує 200 обертів без пошкодження покриття. Всі зразки оздоблені за допомогою контурного нанесення декоративних елементів витримали випробування та відповідають вимогам нормативної документації [10].

При визначенні стійкості покриття до багаторазового вигину на приладі ІПК-2 відзначають кількість вигинів (циклів) до появи таких дефектів, як утворення тріщин, зміна кольору покриття на ділянці складки, осипання покриття. Перші вісім зразків оздоблені за допомогою контурного нанесення декоративних елементів отримали по 4 бали, що дорівнює максимальному значенню у відповідності до ДСТУ 2726-94, не втратили цілісності покриття. У дев'ятого та десятого зразка виявлені невеликі механічні пошкодження.

Таким чином, кращу якість оздоблення за удосконаленою технологією контурного нанесення декоративного елементу показали перші вісім зразків з Красту.

Висновки. Експериментальні дослідження підтвердили актуальність використання лазерного обладнання для контурного нанесення декоративних елементів на деталі та готові вироби зі шкіри. Такий комбінований спосіб значно підвищує техніко-економічні показники та уніфікацію виробництва, дає можливість створити сучасний дизайн виробів високої якості, які користуються попитом серед великої кількості споживачів.

Встановлені та обрані технологічні параметри лазерного гравірування для контурного нанесення декоративних елементів на вироби зі шкіри на різних етапах виробництва. Створено виріб зі шкіри Краст, який був оздоблений декоративними елементами за допомогою удосконаленого способу контурного нанесення. Визначено, що раціональна кількість шарів акрилової фарби для забезпечення високої якості оздоблення виробів із Красту повинна дорівнювати восьми.

Оцінювання якості виконання оздоблення виробу зі шкіри Краст способом контурного нанесення декоративних елементів показало, що вісім шарів акрилової фарби, забезпечують естетичний вигляд виробу та високу стійкість покриття до багаторазового згину (4 бали, що відповідає максимальному значенню за ДСТУ 2726-94) та сухого тертя (витримує 200 обертів без пошкодження покриття).

Впровадження способу контурного нанесення декоративних елементів для оздоблення взуття та шкіргалантерейних виробів поліпшить якість та конкурентоспроможність виробів в цілому.

Література

1. Фукин В.А., Калита А.Н. Технология изделий из кожи : ученик. Ч.1. Москва : Легпромбытиздат, 1988, 272 с.

2. BS EN ISO 2419:2012. Leather. Physical and mechanical tests. Sample preparation and conditioning. doi.org/10.3403/30229909. Режим доступу: https://www.iso.org/standard/56697.html

3. Данилкович А. Г. Практикум з хімії та технології шкіри та хутра: навчальний посібник. Київ : Фенікс, 2006, 340 с.

4. Коновал В.П., Свістунова Л.Т., Олійникова В.В. Технологія взуттєвого виробництва : підручник. Київ : Либідь,2003, 366 с.

5. Григорьянц А.Г. Основи лазерной обработки материалов. Москва : Машиностроение, 1989, 304 с.

6. Зыбин Ю.П. Конструирование изделий из кожи : ученик для вузов / Ю.П. Зыбин, В.М. Ключникова и др. Москва : Легкая и пищевая промышленость, 1982, 416 с.

7. Офіційний сайт компанії Angelus [Електронний ресурс]. - Режим доступу : https://angelusdirect.com/

8. HISTORY OF ANGELUS [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.angeluspaint.co.uk/t-about-angelus.aspx

9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993, 278 с.

10. ДСТУ 2726-94. Шкіра для верху взуття. Технічні умови [Чинний від 1996–01–01]. Київ: Держспоживстандарт, 1995, 14 с.

References

1. Fukin V.A., Kalita A.N. Tehnologiya izdeliy iz kozhi [The technology of leather goods] : uchebnik. Ch.1. Moskva : Legprombytizdat, 1988, 272 p. [in Russian]

2. BS EN ISO 2419:2012. Leather. Physical and mechanical tests. Sample preparation and conditioning. doi.org/10.3403/30229909. Rezhym dostupu: https://www.iso.org/standard/56697.html [in Russian]

3. Danylkovych A. H. Praktykum z khimii ta tekhnolohii shkiry ta khutra: navchalnyi posibnyk. Kyiv.: Feniks, 2006, 340 p. [in Ukriane]

4. Konoval V.P., Svistunova L.T., Oliinykova V.V. Tekhnolohiia vzuttievoho vyrobnytstva [Shoe production technology] : pidruchnyk. Kyiv : Lybid? 2003, 366 p. [in Ukriane]

5. Grigor'janc A.G. Osnovi lazernoj obrabotki materialov. Moskva : Mashinostroenie, 1989, 304 p. [in Russian]

6. Zybina Yu.P. Konstruirivanie izdeliy iz kozhi. [The design of leather goods] : uchebnik dlya vuzov/ Yu.P. Zybina, Klyuchnikovoy i dr. Moskva : Legkaya i pishchevaya prom-ct', 1982, 416 p. [in Russian]

7. Ofitsiinyi sait kompanii Angelus [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: https://angelusdirect.com/

8. HISTORY OF ANGELUS [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: https://www.angeluspaint.co.uk/t-about-angelus.aspx

9. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. Moskva: Radio i svjaz', 1993, 278 p. [in Russian]

10. DSTU 2726-94. Shkira dlia verkhu vzuttia. Tekhnichni umovy [Chynnyi vid 1996–01–01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart, 1995, 14 p. [in Ukriane]

Надійшла / Paper received : 12.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-219-227
УДК 621.372.8

Н.А. ОДЕГОВ, Ю.Б. ВЛАСОВ, Д,А. МЛАДИНОВ
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

АЛФАВИТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАВНОЙ ЭНЕРГИИ

Волоконно-оптические системы (ВОСП) обеспечивают на данный момент наибольшую скорость передачи для опорных и магистральных телекоммуникационных сетей. При этом для систем плотного спектрального мультиплексирования (DWDM) обнаруживается тенденция к уменьшению ширины полос отдельных частотных каналов. В настоящее время для ВОСП DWDM определена общая полоса частот шириной более 20 ТГц. Уменьшение полосы отдельного канала со 100 ГГц до 12,5 ГГц и менее может привести к значительному увеличению количества физических портов: до 2000 и более. Поэтому целесообразным представляется уменьшение агрегация нескольких физических каналов в один логический канал.

Для решения задачи в работе рассматриваются алфавиты оптических сигналов определенного класса. Учитывается, что оптические сигналы претерпевают существенные искажения во временной области. Основная причина таких искажений – дисперсия в оптическом волокне. При отсутствии нелинейных эффектов энергетический спектр сигнала остается практически неизменным по форме. Таким образом, полный алфавит сигналов формируется как система взвешенных по амплитуде и сдвинутых по частоте спектральных функций.

Из полного алфавита выбирается подмножество сигналов равной энергии. Такие подмножества составляют частные алфавиты. Из всевозможных частных алфавитов равной энергии выбирается оптимальный алфавит с максимальным количеством элементов. При необходимости данный оптимальный алфавит дополнительно прореживается с целью исключения сигналов с небольшим расстоянием между ними.

Предложенный подход позволяет оптимизировать ВОСП по критерию энергетической эффективности и минимизировать вероятность ошибки на стороне приема.

В статье предлагаются оптимальные по быстродействию алгоритмы синтеза таких алфавитов. Также рассмотрены альтернативные методы распознавания сигналов на стороне приема

Ключевые слова: дисперсия, алфавит сигналов, сигналы равной энергии, спектр, преобразование Фурье, метрика, алгоритм.

N.A. ODEGOV, Y.B. VLASOV, D.A. MLADINOV
Odessa National O.S. Popov Academy of Telecommunications

ALPHABETS OF EQUAL ENERGY OPTICAL SIGNALS

Fiber optic systems (FOTS) currently provide the highest transmission speed for backbone telecommunication networks. At the same time, for systems of dense wavelength division multiplexing (DWDM), there is a tendency to decrease the bandwidth of individual frequency channels. Currently, for FOTS DWDM, a total frequency band of more than 20 THz is defined. Reducing the bandwidth of an individual channel from 100 GHz to 12.5 GHz or less can lead to a significant increase in the number of physical ports: up to 2000 or more. Therefore, it seems expedient to reduce the aggregation of several physical channels into one logical channel.

To solve the problem, the work considers the alphabets of optical signals of a certain class. It is taken into account that optical signals undergo significant distortions in the time domain. The main cause of such distortion is dispersion in the optical fiber. In the absence of nonlinear effects, the energy spectrum of the signal remains practically unchanged in shape. Thus, the complete signal alphabet is formed as a system of amplitude-weighted and frequency-shifted spectral functions.

A subset of equal energy signals is selected from the full alphabet. Private alphabets constitute such subsets. The optimal alphabet with the maximum number of elements is selected from all possible private alphabets of equal energy. If necessary, this optimal alphabet is additionally thinned out in order to exclude signals with a small distance between them.

The proposed approach makes it possible to optimize the FOTS by the criterion of energy efficiency and to minimize the probability of errors on the receiving side.

The article proposes algorithms for the synthesis of such alphabets that are optimal in terms of speed. Alternative methods of signal recognition on the receiving side are also considered.

Key words: dispersion, signal alphabet, equal energy signals, spectrum, Fourier transform, metric, algorithm.

Введение

Одно из перспективных направлений повышения скорости передачи в волоконно-оптических системах (ВОСП) сводится к построению сигнальных систем, которые обеспечивают передачу в одном тактовом интервале более одного бита информации. Такие системы оптических сигналов (ОС) далее для краткости будем называть алфавитами ОС. Известны различные способы синтеза алфавитов ОС. Перспективным представляется использование квадратично-амплитудной модуляции (QAM4…QAM64) [1,2]. Также разрабатываются методы синтеза ОС с использованием различных способов фазовой модуляции [3-5] и многомерной модуляции [6,7].

В данной работе рассматривается класс ОС [8,9] со спектральной плотностью вида:

$$F_{l,n}(f) = \sum_{n=1}^{N} c_{l,n.} A(f_n), \quad f_n = f_0 + \Delta f, \quad l = 1,2,...,L, \quad n = 1,2,...,N, \tag{1}$$

где N – количество частотных подканалов (далее – дискрет); $A(f)$ – атомарная функция с энергией W; f_n – средняя частота подканала; Δf – общая для всех подканалов ширина полосы; L – общее количество сигналов в алфавите (далее – емкость алфавита); N – общее количество дискрет. Считаем, что функции $A(f_n)$ образуют ортогональную систему. При этом информацию о конкретном сигнале несут значения коэффициентов $c_{l,n.}$.

Учтем, что на стороне приема фотодетекторы реагируют на энергетические параметры ОС [10]. Также заметим, что в линейном режиме передачи ОС во временной области существенно искажается за счет дисперсии в оптическом волокне (ОВ). При этом энергетический спектр остается практически инвариантным по форме [11,12]. Тогда совершенно логичным представляется кодировать информацию квадратами коэффициентов атомарных функций (1): $a_{l,n} = c_{l,n}^2$, а возможные значения параметров $a_{l,n}$ определить на равномерной сетке значений $0,1,2,...,M-1$, где M – общее количество возможных уровней, включая нулевой.

Формализация постановки задач

Данные выше определения сводят задачи исследований алфавитов (1) к задачам анализа некоторых свойств позиционных систем счисления. Действительно, набор коэффициентов $a_{l,n}$ можно рассматривать как N – разрядное число в системе счисления с основанием M. Множество всевозможных значений коэффициентов $a_{l,n}$ будет включать, очевидно, $L_{\max} = M^N$ возможных вариантов. Такое множество далее будем называть полным алфавитом, пару чисел $\{N, M\}$ – его характеристикой, а количество его элементов $L_{\max}$ – емкостью данного алфавита. Не все сигналы полного алфавита равнозначны с точки зрения возможности их генерирования, распространения в линии и возможности распознавания на стороне приема. Неравнозначность связана, прежде всего, с уровнем энергии сигналов.

Не снижая общности рассуждений, далее положим, что атомарные функции в (1) имеют единичную энергию: $W \equiv 1$. Тогда энергия определенного сигнала определяется простой формулой:

$$E_l = \sum_{n=1}^{N} a_{l,n} . \tag{2}$$

Полный алфавит включает один сигнал с энергией $E_0 = 0$, один сигнал с максимальной энергией $E_L = N \cdot (M-1)$ и различное количество сигналов с промежуточной энергией $E_0 < E_k < E_L$. Примеры сигналов алфавита с характеристикой $\{N = 4, M = 5\}$ даны на рис. 1.

При больших значениях характеристики сигналы полного алфавита могут совершенно по-разному вести себя в линиях передачи: слабые вообще не дойдут до точки приема вследствие затухания, а наиболее мощные вызовут сильные нелинейные искажения или вообще расплавят волокно.

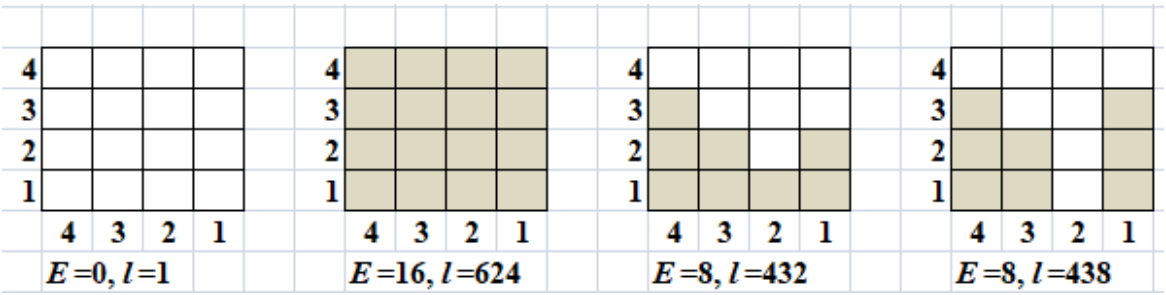


Рис. 1. Примеры сигналов алфавита с характеристикой {*N*=4, *M*=5}

Оптимальный алфавит с практической точки зрения должен удовлетворять следующим неформальным требованиям:

– иметь как можно большую емкость L (условие максимизации скорости передачи, которая будет определяться количеством битов, передаваемых в одном тактовом интервале: $B = \log_2 L$);

– все сигналы алфавита должны иметь приблизительно равную энергию;

– сигналы алфавита должны существенно различаться для обеспечения их распознавания на стороне приема.

При сформулированных выше условиях данные требования можно формализовать в виде взаимосвязанных задач.

1. Задача оптимизации сетки частот и уровней. При заданной энергии E_L максимизировать количество элементов полного алфавита L.

2. Задача синтеза частного алфавита равной энергии с максимальным количеством элементов. Алфавит с характеристикой $\{N, M\}$ можно разделить на $K = N(M-1)+1$ подмножеств (частных алфавитов), каждое из которых включает только сигналы равной энергии: $E_k = k,\ k = 0,1,...,K,\ K = N(M-1)$. Количество элементов в каждом частном алфавите обозначим L_k. ***Требуется***: найти частный алфавит, для которого $L_k^* = \max\{k\}L_k$.

3. Задача о минимальной метрике сводится к прореживанию частного алфавита равных энергий по Задаче 2 таким образом, чтобы для любой пары сигналов конечного алфавита выполнялось условие: $R(l_1, l_2) > R^*$, где R – некоторая метрика в пространстве сигналов. Далее метрику определим простейшим образом:

$$R(l_1, l_2) = \sum_{n=1}^{N} \left| a_{l_1,n-} a_{l_2,n} \right| \tag{3}$$

Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач

Задача 1 имеет простое аналитическое решение, если положить упрощенную формулу расчета максимальной энергии алфавита: $E = N \cdot M$. Тогда при равной энергии сравнению подлежат объемы алфавитов A_1 и A_2: $L_1 = N^M$ и $L_2 = M^N$.

В самом деле, положим, что для алфавита A_1 количество частотных дискрет $N_1 = m$, а количество уровней $M_1 = k \cdot m$, а для алфавита A_2 соответственно $N_2 = k \cdot m$ и $M_2 = m$. Очевидно, что тогда $E_1 = E_2$. Объемы алфавитов: $L_1 = m^{km}$ и $L_2 = (k \cdot m)^m$. Задача сводится к решению неравенства $L_1 \wedge L_2$ и к последовательности эквивалентных неравенств:

$$m^m m^{(k-1)m} \wedge k^m m^m \Leftrightarrow m^{(k-1)m} \wedge k^m \Leftrightarrow \frac{m^{(k-1)m}}{k^m} \wedge 1 \Leftrightarrow L_1 \wedge L_2 .$$

Очевидно, что если $m > k$ и $k \geq 2$, то $\frac{m^{(k-1)m}}{k^m} > 1$. Например, $2^{10} > 10^2$. Иными словами, для увеличения емкости полного алфавита с формальной точки зрения лучше увеличивать количество частотных дискрет, нежели количество уровней. С практической точки зрения характеристика алфавита задается разрешающей способностью спектральных анализаторов и квантователей по уровню на стороне приема. Далее характеристику полного алфавита $\{N, M\}$ будем считать заданной.

Задача 2 в простейшем случае решается в алгоритме из двух проходов.

Первый проход:

1. Исходя из характеристики полного алфавита $\{N, M\}$, определяются возможные значения энергии: $E_0 = 0,\ E_1 = 1,...,\ E_K = N \cdot (M-1)$.

2. Обнуляются сумматоры: S_0, S_1,..., S_K.

3. Определяется емкость полного алфавита: $L_{\max} = M^N$.

4. Организуется цикл по номерам элементов полного алфавита от $l = 0$ до $l = L_{\max}$.

5. Внутри этого цикла каждое десятичное число l представляется в виде коэффициентов $(a_{l,n},\ n = 0,1,...,N-1)$ разложения по степеням N - разрядного числа в системе счисления с основанием M. Для этого используется обычный алгоритм выделения остатков: $a_{l,0} = ord(l, M)$, $d_0 = div(l, M)$, $a_{l,1} = ord(d_0, M)$, $d_1 = div(d_0, M)$ и т.д. до исчерпания разрядной сетки. Здесь и далее: $div(A, B)$ – результат операции целочисленного деления числа A на число B с отбрасыванием остатка; $ord(A, B)$ – остаток целочисленного деления числа A на число B.

6. Внутри этого же цикла определяется сумма коэффициентов по формуле (2): $E_l = \sum_{n=0}^{N-1} a_{l,n}$ (суть –

энергия данного варианта сигнала). Счетчик S_k с номером $k = E_l$ увеличивается на единицу.

Второй проход:

1. Среди сумматоров S_k выбирается сумматор с максимальным значением S^*. Если таких значений 2, то выбирается сумматор с большим номером. Это соответствует тому, что предпочтение отдается частному алфавиту с большим значением энергии сигналов.

2. Выполняется прореживание полного алфавита в цикле от $l = 0$ до $l = L_{\max}$. В состав сигналов частного оптимального алфавита включаются только те сигналы, значение энергии которых равно S^*.

Пример реализации такого алгоритма для простого случая дается в табл. 1.

Таблица 1

Пример синтеза алфавита равных энергий

Полный алфавит {*N*=4, *M*=2}						Оптимальный алфавит равных энергий					
l	***E₁***	***a₃***	***a₂***	***a₁***	***a₀***	***l***	***E₁***	***a₃***	***a₂***	***a₁***	***a₀***
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1	1	2	0	1	0	1
2	1	0	0	1	0	2	2	0	1	1	0
3	2	0	0	1	1	3	2	1	0	0	1
4	1	0	1	0	0	4	2	1	0	1	0
5	2	0	1	0	1	5	2	1	1	0	0
6	2	0	1	1	0						
7	3	0	1	1	1						
8	1	1	0	0	0						
9	2	1	0	0	1						
10	2	1	0	1	0						
11	3	1	0	1	1						
12	2	1	1	0	0						
13	3	1	1	0	1						
14	3	1	1	1	0						
15	4	1	1	1	1						

На самом деле емкость полного алфавита даже при незначительных параметрах характеристики может быть огромным. Например, полный алфавит с характеристикой $\{N = 10, M = 8\}$ (количество частотных дискрет 10, количество уровней 8, включая нулевой) имеет емкость: $L = 8^{10} = 1073741824$. Как тут не вспомнить легенду о шахматной доске [13] и восклицание Ричарда Беллмана: «Проклятие размерности!» [14]. Поэтому определенную проблему составляет переход от алгоритмов полного перебора к эквивалентным или почти эквивалентным алгоритмам меньшей конструктивной размерности. Существенно уменьшить количество вычислений в Задаче 2 и реализовать алгоритм в один проход позволяют следующие положения комбинаторики (точнее, математики целых чисел) [15].

Количество *N*–значных чисел в *M*–ичной системе счисления, у которых сумма цифр равна *k* определяется числом $C_M(k, N)$, которые выражаются через биномиальные коэффициенты с помощью рекуррентной формулы (формулы с повышением основания *m* системы счисления):

$$C_M(k, N) = C_N^0 C_{M-1}(k - N, N) + C_N^1 C_{M-1}(k - N + 1, N - 1) + \cdots + C_N^N C_{M-1}(k, 0). \quad (4)$$

Для разгона алгоритма (4) используется базовое значение $C_2(k, N) = C_N^K$ для двоичной системы счисления. Здесь $C_N^k = \dfrac{N!}{k!(N-k)!}$ – биномиальные коэффициенты. Для троичной системы счисления из формулы (4) следует разложение с использованием только биномиальных коэффициентов:

$$C_3(k, N) = C_N^0 C_{k-N}^N + C_N^1 C_{k-N+1}^{N-1} + \ldots + C_N^N C_k^0. \quad (5)$$

Также важным есть свойство симметрии чисел $C_M(k, N)$:

$$C_M(k, N) = C_M(N(M-1) - k, N). \quad (6)$$

Уровень энергии сигналов оптимального частного алфавита с максимальным количеством элементов позволяет установить следующая теорема:

Теорема об алфавите сигналов максимальной мощности. Для алфавита сигналов с характеристикой $\{N, M\}$ и максимальной энергией $E_{\max} = N \cdot (M - 1)$ наибольшую емкость имеет

частный алфавит с сигналами средней энергии $E^* = k^* = div(E_{\max},2) + ord(E_{\max},2)$.

Иначе говоря, оптимальный частный алфавит должен содержать сигналы с энергией, примерно равной половине максимально возможной энергии сигналов полного алфавита.

Доказательство. Теорема доказывается по индукции. Для двузначных чисел (уровни дискрет 0 или 1) $k^* = div(N,2) + ord(N,2)$. Тогда для $k < N$ емкость частого алфавита $L_k = C_N^k$. Покажем, что при определенных условиях $L_{k+1} \geq L_k$.

Поскольку $L_{k+1} = C_N^{k+1} = \dfrac{N!}{(k+1)!(N-k-1)!}$, то $L_{k+1} = C_N^k \dfrac{N-k}{k+1} = L_k \dfrac{N-k}{k+1}$. Для того, чтобы выполнялось условие $L_{k+1} \geq L_k$ достаточно, чтобы $N-k \geq k+1$, что выполняется для всех $k < div(N,2) + ord(N,2) = k^*$. Если $k > k^* + 1$, то на основании свойства симметрии (5) последовательность L_k убывающая. Следовательно, k^* - номер алфавита максимальной емкости с сигналами равной энергии. Аналогичным образом по формуле (5) доказывается теорема для сигналов с 3-мя уровнями энергии, а с помощью рекуррентной формулы (2) далее по индукции для $M > 3$.

Из этой теоремы следует правило упрощения алгоритма решения Задачи 2: на первом шаге вычисляется величина $E_{\max} = N \cdot (M-1)$, далее определяется значение энергии сигналов частого алфавита $E^* = div(E_{\max},2) + ord(E_{\max},2)$. Затем в один проход селектируются сигналы с уровнем заданной энергии E^* и определяется общее количество таких элементов (емкость алфавита) L_{opt}. Таким образом, формируется подмножество сигналов в виде алфавита A_{opt}.

Решение **Задачи 3** в простом варианте требует анализа матрицы расстояний $R(l_1, l_2)$ (3) между всеми парами элементов частного алфавита A_{opt} с номерами $l_1, l_2 \subset \{0, 1, ..., L_{opt} - 1\}$. В результате такого анализа вычеркиваются все элементы, для которых расстояние с любым другим меньше заданного. Решение задачи в таком варианте несколько упрощается с учетом симметричности матрицы $R(l_1, l_2)$ и того факта, что на ее главной диагонали располагаются нули. Тем не менее, конструктивная размерность алгоритма имеет порядок L_{opt}^2, что даже для относительно малых значений характеристик алфавитов превышает возможности современных высокопроизводительных компьютеров.

Радикально уменьшить количество вычислений позволяет использование основополагающего принципа динамического программирования [14]: из всевозможных путей выбора решений на каждом шаге многошагового алгоритма выбирается наиболее оптимальный на одном или на нескольких шагах.

В нашем случае интерпретация этого принципа приводит к следующему алгоритму.

1. В стек сигналов алфавита A_R, удовлетворяющего условию минимальной заданной метрики $R(l_1, l_2) > R^*$, в позицию нулевого элемента включается сигнал F_0^* с номером 0 из алфавита A_{opt}. Такой начальный выбор обусловлен тем, что в алфавите A_{opt} сигнал с нулевым номером имеет самые значительные коэффициенты в младших разрядах.

2. В цикле от $l = 1$ до $l = L_{opt} - 1$ выбирается очередной сигнал F_l. Вычисляется расстояние $R(F_0^*, F_l)$. Если $R(F_0^*, F_l) > R^*$, то сигнал $F_1^* = F_l$ заносится в стек алфавита A_R с номером 1. Если условие не выполнено, то цикл по l продолжается без занесения сигнала в стек A_R. И т.д. с постепенным заполнением стека $F_0^*, F_1^*, ..., F_{nn}^*$.

3. Если в продолжении цикла по l обнаруживается очередной сигнал, для которого выполнено условие $R(F_{nn}^*, F_l) > R^*$, то организуется внутренний цикл проверок условия минимальной метрики с ранее отобранными в состав алфавита A_R сигналами. Если для всех ранее отобранных ранее сигналов $R(F_{kk}^*, F_l) > R^*$, $kk = nn-1, nn-2, ..., 0$, то сигнал F_l заносится в стек алфавита A_R с номером $nn+1$.

Таким образом, определяется алфавит A_R сигналов равной энергии со взаимными расстояниями не меньше заданного и с общим количество элементов (емкостью алфавита) L_R.

Рассмотренные алгоритмы реализуются авторской программой Alphabet (язык программирования C#, платформа программирования Visual Studio). Вариант состояния окна программы показан на рис. 2.

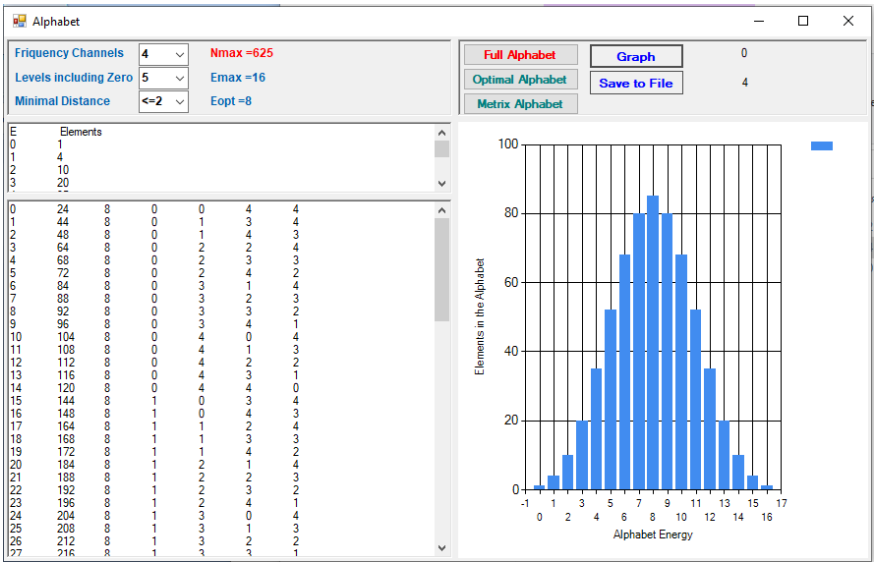


Рис. 2. Окно программы Alphabet

Программа Alphabet позволяет определять коэффициенты полного алфавита (1) , частного алфавита сигналов равной энергии с максимальным количеством элементов, а также выделять алфавит сигналов, расстояние между которыми больше 2 единиц. Результаты работы программы в табличном виде могут быть сохранены во внешнем файле для последующей обработки. В графическом окне выводится гистограмма распределения количества сигналов равной энергии по уровням энергии. Примеры таких гистограмм для разных характеристик алфавитов $\{N, M\}$ даны на рис. 3.

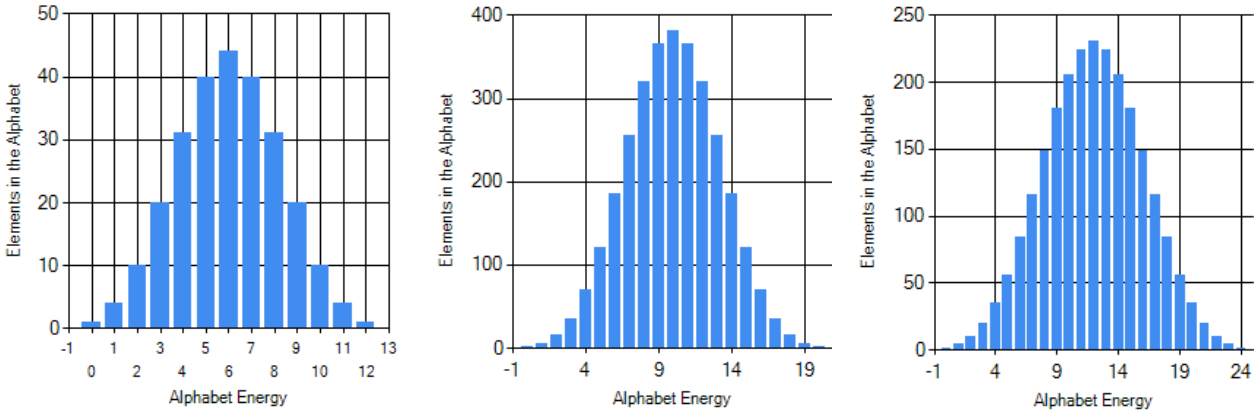


Рис. 3. Гистограммы распределения энергии частных алфавитов полного алфавита с характеристиками {4,4}, {5,5} и {4,7}

Сводка некоторых результатов работы программы Alphabet дана в табл. 2.

Таблица 2

Примеры расчета параметров алфавитов с характеристиками {N,M}

{N,M}	L_{max}	E_{max}	L_{opt}	E_{opt}	L_R,	{N,M}	L_{max}	E_{max}	L_{opt}	E_{opt}	L_R,
3,3	27	6	7	3	3	5,3	243	10	51	5	11
3,4	64	9	12	5	4	5,4	1024	15	155	8	30
3,5	125	12	19	6	7	5,5	3125	20	381	10	70
3,6	216	15	27	8	8	5,6	7776	25	780	13	134
4,3	81	8	19	4	7	5,7	16807	30	1451	15	250
4,4	256	12	43	6	12	6,3	729	12	141	6	25
4,5	625	16	85	8	25	6,4	4096	18	680	9	84
4,6	1296	20	146	10	38	8,3	6561	16	1107	8	155

Анализ данных табл. 2 показывает, что при относительно небольшом количестве частотных дискрет N и количестве уровней M можно синтезировать частные алфавиты равной энергии с большим количеством элементов. При этом подмножество сигналов равной энергии со значительными взаимными расстояниями также может быть значительным. Например, для алфавита с 5-ю частотными дискретами и 7-ю уровнями количество сигналов равной энергии 1451, а количество значительно различающихся сигналов

250. Таким образом, скорость передачи может быть увеличена в данном простом случае примерно в 10,5 раза по сравнению с бинарным кодированием. Для подмножества сигналов с большими взаимными расстояниями эта скорость может быть увеличена более чем в 8 по сравнению с бинарным кодированием.

Методы распознавания сигналов алфавита на стороне приема

Распознавание элементов алфавита на стороне приема представляет отдельную техническую задачу. Использование метрики (3) для сравнения сигнала F^*, полученного на стороне приема, и образа сигнала F_l позволяет решать задачу с максимальной скоростью. Действительно, вычисление функционала (3) требует простейших операций двоичной логики типа сложения одного числа с обратным или дополнительным кодом другого числа. При этом коэффициенты разложения функций F_l на стороне приема сразу могут храниться в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) в обратном или дополнительном коде.

Однако, данная метрика не инвариантна к затуханию сигнала в ОВ. Действительно, сигнал F^* на стороне приема это один из сигналов алфавита, но значительно ослабленный. Пусть в исходном алфавите он имеет номер k. Тогда на стороне приема $F^* = \gamma \cdot F_k$, где $\gamma << 1$ – линейный коэффициент передачи, связанный очевидным образом с коэффициентом затухания. Представим коэффициенты разложения принятого сигнала в виде: $b_n = \gamma^2 a_{k,n}$, $n = 1, 2, ..., N$. Коэффициенты принятого сигнала $a_{k,n}$ выразим через коэффициенты образа сравнения: $a_{k,n} = a_{l,n} + \Delta a_n$. В силу условия равенства энергий $\sum_{n=1}^{N} \Delta a_n = 0$. С учетом очевидного неравенства $|a - b| \le |a| + |b|$ и знаков величин для метрики (3) получается справедливо:

$$R(F_l, F^*) = \sum_{n=1}^{N} \left| a_{l,n} - \gamma^2 a_{l,n} - \Delta a_n \right| \le (1-\gamma^2) \sum_{n=1}^{N} a_{l,n} + \gamma^2 \sum_{n=1}^{N} |\Delta a_n| = (1-\gamma^2) \sum_{n=1}^{N} a_{l,n} + \gamma^2 R(F_l, F_k).$$

Тогда при значительном ослаблении ОС, $\gamma^2 << 1$, $R(F_l, F^*) \approx E_l$ независимо от номера образа сравнения l. То есть, ОС на стороне приема оказываются практически неразличимыми. С другой стороны, если $\gamma = 1$, то $R(F_l, F^*) \equiv R(F_l, F_k)$, то есть, метрика сохраняется. Вывод: для использования метрики (3) требуется почти идеальное предварительное усиление принятого сигнала с коэффициентом усиления $1/\gamma$, что не всегда возможно.

Для распознавания сигналов давно используются корреляционные методы [17]. Результаты распознавания при этом инвариантны к затуханию сигнала. Для алфавита (1) преобразование Фурье свертки сигналов во временной области дает произведение спектральных плотностей [18]. Тогда для распознавания принятого сигнала со спектральной плотностью $F^*(f) = \sum_{n=1}^{N} b_n A(f_n)$ выполняется последовательное или параллельное сравнение с образами частного алфавита по Задаче (2) с помощью вычисления функционалов:

$$Q_l = \int_{-\infty}^{\infty} F^*(f) \cdot F_l(f) df = \gamma \int_{-\infty}^{\infty} F_k^*(f) \cdot F_l(f) df, \quad (7)$$

где $F_k^*(f)$ – один из сигналов алфавита A_{opt} по Задаче 2. Но с учетом ортогональности и нормировки атомарных функций алфавита (1) функционал (7) представляется суммой произведений коэффициентов:

$$Q_l = \gamma \sum_{n=1}^{N} c_{k,n} \cdot c_{l,n}. \quad (8)$$

Покажем, что функционал (8) достигает максимума только в том случае, если $F_k^* \equiv F_l$. Для этого при каждом индексе n определим среднее арифметическое значение $d_n = (c_{k,n} + c_{l,n})/2$. И пусть коэффициенты при этом индексе отличаются на некоторую величину $\delta_n = c_{k,n} - c_{l,n}$. Тогда коэффициенты при индексе n представляются в виде: $c_{l,n} = d_n - \delta_n / 2$; $c_{k,n} = d_n + \delta_n / 2$. Но тогда:

$$c_{k,n} \cdot c_{l,n} = (d_n + \delta_n / 2) \cdot (d_n - \delta_n / 2) = d_n^2 - \delta_n^2 / 4 \le d_n^2, \quad (9)$$

причем равенство в выражении (9) достигается, только если $\delta_n \equiv 0$. То есть, когда $c_{k,n} \equiv c_{l,n}$. Распространяя неравенство (9) на все индексы n, получаем что максимум функционалов (7) и (8) достигается только для того случая, когда принятый сигнал совпадает с определенным элементом оптимального алфавита A_{opt}.

Определенным недостатком процедур вычисления функционалов (8) по сравнению с вычислением метрики (3) является необходимость выполнения операций умножения. В цифровых устройствах такие операции выполняются многократным сложением [16], что делает их неприемлемыми для высокоскоростных ВОСП. Перспективным представляется использование методов гомоморфной фильтрации [18], где используются прямые и обратные нелинейные преобразования. Так, предлагается [9] операцию умножения заменить операцией сложения логарифмов чисел $c_{k,n}$ и $c_{l,n}$, а результат сложения логарифмов потенцировать. Операция логарифмирования принятого сигнала после его разделения по частотным дискретам может выполняться практически безинерционно логарифмическими усилителями. В двоичной системе счисления операция потенцирования также выполняется с малой задержкой: путем смещения единицы младшего разряда на соответствующее число разрядов влево.

Выводы

Существующая тенденция уменьшения ширины частотных каналов DWDM приводит к значительному увеличению количества физических портов мультиплексоров. В ряде случаев представляется целесообразным уменьшение количества этих портов за счет агрегирования нескольких физических каналов в один логический канал. Одним из методов такого агрегирования является использование рассматриваемого класса алфавитов оптических сигналов. При этом важно сохранять энергетический баланс между различными сигналами алфавита.

Предложенные алгоритмы позволяют из общего множества сигналов выделять подмножества сигналов равной энергии. При этом вычислительные процедуры оптимизируются по количеству операций.

Многочисленные расчеты показывают, что даже при относительно небольшом количестве частотных дискрет и возможных уровней подмножества сигналов равной энергии могут содержать значительное количество элементов. При этом скорость передачи может быть увеличена на порядки по сравнению с бинарным кодированием.

На стороне приема при выполнении достаточно корректного предварительного усиления для распознавания сигналов можно применять простейшие линейные метрики. В общем случае проблема распознавания может решаться корреляционными методами с использованием процедур гомоморфной фильтрации.

Литература

1. Li Zhao, Ying Zhang, Wen Zhou, Probabilistically shaped 64QAM OFDM signal transmission in a heterodyne coherent detection system, Optics Communications, Volume 434, 2019, Pages 175-179, ISSN 0030-4018, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.10.062.

2. Jie Liu, Kangping Zhong, Zhenhua Dong, Changjian Guo, Alan Pak Tao Lau, Chao Lu, Yanzhao Lu, Signal power distribution based modulation format identification for coherent optical receivers, Optical Fiber Technology, Volume 36, 2017, Pages 75-81, ISSN 1068-5200, https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.02.009.

3. Jian Shen, Shibao Wu, Dan Li, Ultra-flat optical frequency comb generation based on phase modulation with simple digital driving signal, Optik, Volume 198, 2019, 163254, ISSN 0030-4026, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163254.

4. Xuehua Zhu, Huicheng Yang, Guangzhen Dai, Guanling Wang, Experimental demonstration of optical single sideband signal generation based on multi-frequency phase modulation in optical fibers, Optik, Volume 182, 2019, Pages 712-715, ISSN 0030-4026, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.012.

5. Sha Zhu, Xiaojie Fan, Ming Li, Ning Hua Zhu, Wei Li, Optically controlled multi-carrier phase-shift-keying microwave signal generation by using cross-polarization modulation in highly nonlinear fiber, Optics Communications, Volume 469, 2020, 125805, ISSN 0030-4018, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125805.

6. Peter J. Winzer, René-Jean Essiambre, 2 - Advanced optical modulation formats, Editor(s): Ivan P. Kaminow, Tingye Li, Alan E. Willner, In Optics and Photonics, Optical Fiber Telecommunications V B (Fifth Edition), Academic Press, 2008, Pages 23-93, ISSN 15575837, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374172-1.00002-3.

7. Zilong He, Wentao Liu, Sheping Shi, Bailin Shen, Xue Chen, Xiqing Gao, Qi Zhang, Dongdong Shang, Yongning Ji, Yingfeng Liu, Flexible multi-dimensional modulation method for elastic optical networks, Optics Communications, Volume 359, 2016, Pages 304-310, ISSN 0030-4018, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.098.

8. Власов Ю. Б. Методика формування опичного сигналу з заданими характеристиками / Ю.Б. Власов під кер. М.А. Одегова // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Одеса, 16-19 листопада. – 2020. – С. 85-89.

9. Младінов Д.П. Дослідження кореляційного методу розпізнавання оптичних сигналів у спектральному просторі / Д.П. Младінов під кер. М.А. Одегова // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Одеса, 16-19 листопада. – 2020. – С. 270-273.

10. Анисимова И.Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И.Д. Анисимова, И.М. Викулин, Ф.А. Заитов, Ш.Д. Курмашев: Под ред. В.И. Стафеева. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

11. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.

12. Одегов Н.А Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні нуки. – 2018. – № 5. – С. 42-72.

13. Легенда о шахматной доске / [Электронный ресурс] режим доступа: http://math4school.ru/legenda_o_shahmatnoj_doske.html

14. Беллман Р.Э. Динамическое программирование / Р.Э. Беллман. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 402 с.

15. Виленкин Н.Я. Комбинаторика / Н.Я. Виленкин. – М.: Наука, 1969. – 328 с.

16. Сединин В.И., Микушин А.В., Сажнев А.М. Цифровые устройства и микропроцессоры. — С.Петербург: БХВ, 2010. — 832 с.

17. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин, Г.А. Костин и др. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.

18. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для ВУЗов – 4-е изд. / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.

References

1. Li Zhao, Ying Zhang, Wen Zhou, Probabilistically shaped 64QAM OFDM signal transmission in a heterodyne coherent detection system, Optics Communications, Volume 434, 2019, Pages 175-179, ISSN 0030-4018, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.10.062.

2. Jie Liu, Kangping Zhong, Zhenhua Dong, Changjian Guo, Alan Pak Tao Lau, Chao Lu, Yanzhao Lu, Signal power distribution based modulation format identification for coherent optical receivers, Optical Fiber Technology, Volume 36, 2017, Pages 75-81, ISSN 1068-5200, https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.02.009.

3. Jian Shen, Shibao Wu, Dan Li, Ultra-flat optical frequency comb generation based on phase modulation with simple digital driving signal, Optik, Volume 198, 2019, 163254, ISSN 0030-4026, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163254.

4. Xuehua Zhu, Huicheng Yang, Guangzhen Dai, Guanling Wang, Experimental demonstration of optical single sideband signal generation based on multi-frequency phase modulation in optical fibers, Optik, Volume 182, 2019, Pages 712-715, ISSN 0030-4026, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.012.

5. Sha Zhu, Xiaojie Fan, Ming Li, Ning Hua Zhu, Wei Li, Optically controlled multi-carrier phase-shift-keying microwave signal generation by using cross-polarization modulation in highly nonlinear fiber, Optics Communications, Volume 469, 2020, 125805, ISSN 0030-4018, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125805.

6. Peter J. Winzer, René-Jean Essiambre, 2 - Advanced optical modulation formats, Editor(s): Ivan P. Kaminow, Tingye Li, Alan E. Willner, In Optics and Photonics, Optical Fiber Telecommunications V B (Fifth Edition), Academic Press, 2008, Pages 23-93, ISSN 15575837, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374172-1.00002-3.

7. Zilong He, Wentao Liu, Sheping Shi, Bailin Shen, Xue Chen, Xiqing Gao, Qi Zhang, Dongdong Shang, Yongning Ji, Yingfeng Liu, Flexible multi-dimensional modulation method for elastic optical networks, Optics Communications, Volume 359, 2016, Pages 304-310, ISSN 0030-4018, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.098.

8. Vlasov YU. B. Metodika formuvannya opichnogo signalu z zadanimi harakteristikami / YU.B. Vlasov pid ker. M.A. Odegova // Materiali X Mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії «Infokomunikacії – suchasnist' ta majbutnє», Odesa, 16-19 listopada. – 2020. – S. 85-89.

9. Mladinov D.P. Doslidzhennya korelyacijnogo metodu rozpiznavannya optichnih signaliv u spektral'nomu prostori / D.P. Mladinov pid ker. M.A. Odegova // Materiali X Mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії «Infokomunikacії – suchasnist' ta majbutnє», Odesa, 16-19 listopada. – 2020. – S. 270-273.

10. Anisimova I.D. Poluprovodnikovye fotopriemniki: Ul'trafioletovyj, vidimyj i blizhnij infrakrasnyj diapazony spektra / I.D. Anisimova, I.M. Vikulin, F.A. Zaitov, SH.D. Kurmashev: Pod red. V.I. Stafeeva. – M.: Radio i svyaz', 1984. – 216 s.

11. Agraval G. Nelinejnaya volokonnaya optika / Agraval G. – M.: Mir, 1996. – 323 s.

12. Odegov N.A Osnovy teorii approksimacii opticheskih signalov gaussovymi impul'sami / N.A. Odegov // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tekhnichni nuki. – 2018. – № 5. – S. 42-72.

13. Legenda o shahmatnoj doske / [Elektronnyj resurs] rezhim dostupa: http://math4school.ru/legenda_o_shahmatnoj_doske.html

14. Bellman R.E. Dinamicheskoe programmirovanie / R.E. Bellman. – M.: Izd-vo inostrannoj literatury, 1960. – 402 s.

15. Vilenkin N.YA. Kombinatorika / N.YA. Vilenkin. – M.: Nauka, 1969. – 328 s.

16. Sedinin V.I., Mikushin A.V., Sazhnev A.M. Cifrovye ustrojstva i mikroprocessory. — S.Peterburg: BHV, 2010. — 832 s.

17. SHirman YA.D. Teoreticheskie osnovy radiolokacii / YA.D. SHirman, V.N. Golikov, I.N. Busygin, G.A. Kostin i dr. – M.: Sovetskoe radio, 1970. – 560 s.

18. Gonorovskij I.S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly: Uchebnik dlya VUZov – 4-e izd. / I.S. Gonorovskij. – M.: Radio i svyaz', 1986. – 512 s.

Надійшла / Paper received : 11.10.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik

Підп. до друку 30.10.2019 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