

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

3.2022

ВІСНИК

**Хмельницького
національного
університету**

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2022, Issue 3, Volume 309

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, 2022, № 3(309)

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

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського http://nbuv.gov.ua/j-tit/Vchnu_tekh

Включено до науково-метричних баз:

Google Scholar	http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aUP9OYAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221
CrossRef	http://doi.org/10.31891/2307-5732

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

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н., Говорущенко Т.О., д.т.н., Гордєєв А.І., д.т.н., Горященко С. Л., к.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Зацепкіна Н.М., д.т.н., Рубаненко О. О., 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., Любош Хес, д.т.н., (Чехія), 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., Малогулко Ю. В., к.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Параска О.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Горошко А.В., д.т.н., Сарібекова Ю.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., Бубулєс Альгімантас, доктор наук (Литва), Елсаєд Ахмед Ельнашар, доктор наук (Єгипет), Кальчинські Томаш, доктор наук (Польща), Лунтовський Андрій, 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)

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 17 від 26.05.2022 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
e-mail:	visnyk.khnu@khmnu.edu.ua	http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія KB № 24922-14862ПР від 12 липня 2021 року

© Хмельницький національний університет, 2022
Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2022

ЗМІСТ

ФРИЗ М. Є., МЛИНКО Б. Б. УМОВНІ ЛІНІЙНІ ВИПАДКОВІ ПРОЦЕСИ З ДИСКРЕТНИМ ЧАСОМ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ	7
ГНАТЧУК Є. Г. ПРАВИЛА І МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ДОНОРСТВА І ТРАНСПЛАНТАЦІЇ НА ОСНОВІ ЦИВІЛЬНОГО ПРАВА	13
МОСКАЛЕНКО А. О., ОСЯДЛИЙ В. В. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДОСТАТНОСТІ МЕДИЧНИХ ДАНИХ	19
ОСОЛІНСЬКИЙ О. Р., КОЧАН В. В., САЧЕНКО А. О., КОЧАН О. В., КОЧАН Р. В. ФОРМУВАЧ ІМПУЛЬСІВ ДОВІЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ	25
АНТОНЮК А. А., КОЛЯДА К. В. ПОВЕДІНКОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ БЛОКІВ ДАНИХ ПРИ ЇХ ВІДДАЛЕНОМУ РОЗПОДІЛЕНОМУ ЗБЕРІГАННІ	29
ГАГЕН В. А. ПРОЕКТУВАННЯ АРХЕТИПОВОЇ МОДЕЛІ СЕМАНТИЧНОЇ СУМІСНОСТІ МЕДИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ	33
ГУРМАН І. В., МОТОРНИЙ П. В., ЧЕШУН В. М., ДЖУЛІЙ А. В., ЧОРНЕНЬКИЙ В. І. АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ДИСКРЕТНИХ ТЕСТІВ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ТЕОРІЙ	40
ПРАВОРСЬКА Н. І., ГРИПІНСЬКА Н. В. ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА ВИКОРИСТАНІ ОЦІНОЧНІ МЕТРИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЯКІ ПРОВІДИЛИСЬ ПРИ РОЗРОБЦІ МОВНО-НЕЗАЛЕЖНОГО ІНКРЕМЕНТНОГО ДЕТЕКТОРА	44
ШАХОВСЬКА Н. Б., ШЕБЕКО А. РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ З ФОТОГРАФІЙ ДОКУМЕНТІВ	50
МЕЛЬНИКОВА Н. І., ПОБЕРЕЙКО П. Б. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОШУКУ КЛЮЧОВИХ КАДРІВ У ВІДЕОПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ СИСТЕМ ПОШУКУ	55
КРИВЕНЧУК Ю. П., МАРКО О. М. СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ТРЕКІНГУ ОБ'ЄКТІВ НА ВІДЕО	61
КРИВЕНЧУК Ю. П., ЯКИМІВ Р. Ю. СИСТЕМА АНАЛІЗУ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ ВІКУ	66
БАГРІЙ Р. О., ПЕТРОВСЬКИЙ С. С. ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНОГО ТЕСТУВАННЯ ВЕБ-ДОДАТКІВ	70
КИРИЦЯ І. Ю. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНІ КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ	75
БРАЦЛАВЕЦЬ Б. С. ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ГАЛЬВАНІЧНИМИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ ЦИНКУ	82
КОСНОК М. М. КОГЕНЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА НА ОСНОВІ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ	85
КУЧЕРЕНКО Ю. С. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ	89
ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г., ПАНАСЮК І. В. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГАЛТУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ТИПУ «TURBULA» ПРИ ВИКОНАННІ ВІДДІЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ВІД ЛИВНИКІВ	92
БІЛИЙ Л. А., ПОЛІЩУК О. С., ЛІСЕВИЧ С. П., ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ А. М., МЕЛЬНИК В. І. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЧУТЛИВОСТІ СИСТЕМИ ДО СВОЇХ ПОЧАТКОВИХ УМОВ	99
ПОЛІЩУК О. С., ПОЛІЩУК А. О., ЛІСЕВИЧ С. П., ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ А. М., МЕЛЬНИК В. І. ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ТА ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ З КОМПОЗИТНИХ НИТОК З ВИСОКИМ ВМІСТОМ МЕТАЛУ	104
ЯЛИНА О. О. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІМПУЛЬСНОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН	111
ЯНІШЕВСЬКИЙ В. Ю. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ОБ'ЄМНОГО ГІДРОПРИВОДА	115

БУРБЕЛО М. Й., ЛЕБЕДЬ Д. Ю., ЛЕЩЕНКО О. Р. ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ ЗАРЯДУ/РОЗРЯДУ КОНДЕНСАТОРІВ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ПІД ЧАС КОЛИВАНЬ НАПРУГИ	119
ОСАДЧУК Я. О., ОСАДЧУК О. В., ОСАДЧУК В. С. АВТОГЕНЕРАТОРНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ТИСКУ	125
ЛЕВКІН Д. А. АРХІТЕКТОНІКА РОЗРАХУНКОВИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	135
КУТІН В. М., КУТІНА М. В., ШПАЧУК О. О. МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ БЛОКУ «ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР»	138
ЛАРІН О. О., ПОТОПАЛЬСЬКА К. Є., ГРІНЧЕНКО Є. М. ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ НАСОСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ З ПРОГНОЗОВАНИМ СТОПНЕННЯМ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ВНАСЛІДОК КОРОЗІЇ	143
КОВТУН І. І., ПЕТРАЩУК С. А., БОЙКО Ю. М. ВПЛИВ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ НА ВИНИКНЕННЯ ТА ПЕРЕДАЧУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ	150
БОЙКО Ю. М., ПОЛІКАРОВСЬКИХ О. І., ТКАЧУК В. П., АВДЄЄВ В. М., СВИСТУНОВ О. С. МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА	158
ЄВСЕЄНКО О. М., КАЧАНОВ П. О. ПОБУДОВА SCADA-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРИМІЩЕНЬ ТОРГОВЕЛЬНОГО ЦЕНТРУ	168
СМОЛІН Ю. О. ОБГОВОРЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ВИЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНОЛОГІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ	177
БЕРЕЗІН Л. М. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ НА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ В'ЯЗАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ШКАРПЕТКОВИХ АВТОМАТІВ	184
ГІРЕНКО Н. І., КРАМАРЕНКО Д. П. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ ТРИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ ЯК ОСНОВИ ДЛЯ ФАРШЕВОЇ МАСИ З М'ЯСОМ ПТИЦІ ТА РОСЛИННИМИ ГІДРОБІОНТАМИ	189
КАРМАЛІТА А. К., ПУНДИК С. І., ДРАПАК Г. М., МЕЛЬНИК В. І. АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ СПОСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОЛОЖЕННЯ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ВЗУТТЯ ПО ВЛАСТИВОСТЯХ ПОВЕРХОНЬ	194
СЛАВІНСЬКА А. Л., МАТЮХ С. А., МИЦА В. В. ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА ДЛЯ КУПАЛЬНОГО КОСТЮМА	199
БРЕДУН В. І. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЛОГІСТИКИ ТІП У ПОЛТАВСЬКІЙ ОБЛАСТІ	205
ГРИЦЮК П. М., БАБИЧ Т. Ю., КРАСЬКО Б. В. КЛАСИФІКАЦІЙНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ	209
ЩЕРБАНЬ В. Ю., ІЩЕНКО В. Д., КОЛИСКО О. З., ГОЛЬДБЕРГ М. І., ЩЕРБАНЬ Ю. Ю. КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ДЕЙКСТРИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ ЗАПРАВКИ НИТКИ НА ОСНОВІ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ ГРАФА	217
ПРИГОЖЕВ О. С. МОВНОНЕЗАЛЕЖНИЙ РЕПОЗИТАРІЙ ПРОГРАМНОГО КОДУ	221
МАМУТА М. С., МАМУТА О. Д. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОКАНАЛЬНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ КОМПЛЕКСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ	229
БОЙКО С. М., ЩОКІН В. П., ВИШНЕВСЬКИЙ С. Я., ДАНІЛІН О. В., ПОДГОРНИХ Н. В. ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ ПРИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМИ ЇХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	233
ЗАХАРКЕВИЧ О. В., КУЛЕШОВА С. Г., ТКАЧУК С. В., ЛУК'ЯНЧУК С. В. АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОДЯГУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	240
СТРЕЛЬБИЦЬКИЙ В. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ НА РЕСУРС МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ МОСТОВИХ КРАНІВ МОРСЬКИХ ПОРТІВ	249
ФІНИК І. В. МЕТОДИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ	254
ШАМУРАТОВ О. Ю. МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ НА ОСНОВІ ВИБОРУ ОЗНАК	260
МЕЛЬНИК А. М. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНОГО ТА ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ	265

CONTENT

MYKHAILO FRYZ, BOGDANA MLYNKO DISCRETE-TIME CONDITIONAL LINEAR RANDOM PROCESSES AND THEIR PROPERTIES	7
YELYZAVETA HNATCHUK RULES AND METHOD OF SUPPORTING THE DECISION MAKING ABOUT THE POSSIBILITY OF DONATION AND TRANSPLANTATION BASED ON THE CIVIL LAW	13
ARTEM MOSKALENKO, VITALIY OSYADLYI MODEL AND METHOD OF ASSESSING THE MEDICAL DATA SUFFICIENCY	19
OLEKSANDR OSOLINSKY, VOLODYMYR KOCHAN, ANATOLIY SACHENKO, OREST KOCHAN, ROMAN KOCHAN ARBITRARY DURATION PULSE SHAPER	25
ANTON ANTONIUK, KOSTIANTYN KOLIADA BEHAVIORAL MODEL OF DATA BLOCK RECOVERY SYSTEM FOR THEIR REMOTE DISTRIBUTED STORAGE	29
VALENTYN HAHEN ARCHETYPICAL MODEL OF SEMANTIC COMPATIBILITY OF MEDICAL INFORMATION SYSTEMS PROJECTING.....	33
IVAN GURMAN, PAVLO MOTORNYI, VIKTOR CHESHUN, ANDRII DZHULIY, VITALII CHORNENKYI ALGORITHM OF SYNTHESIS OF DISCRETE TESTS BASED ON EVOLUTIONARY THEORIES	40
NATALYA PRAVORSKA, NADIHA HRYPYNSKA EXPERIMENTS AND USED EVALUATION METRICS USED IN THE DEVELOPMENT OF A LANGUAGE-INDEPENDENT INCREASE DETECTOR	44
NATALIYA SHAKHOVSKA, ANDRII SHEBEKO DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF DOCUMENT OPTICAL CHARACTER RECOGNITION SYSTEM	50
NATALIYA MELNYKOVA, PETRO POBEREIKO RESEARCH OF METHODS OF SEARCHING KEY FRAMES IN VIDEO FLOW WITH THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR SEARCH SYSTEMS	55
YURIY KRYVENCHUK, OLEKSANDRA MARKO CREATION OF OBJECT RECOGNITION AND TRACKING SYSTEM.....	61
YURIY KRYVENCHUK, ROMAN YAKYMIV CREATION OF AGE ESTIMATION SYSTEM	66
RUSLAN BAHRII, SERHII PETROVSKYI FEATURES OF MODERN WEB APPLICATION TESTING	70
INNA KYRYTSYA PHENOMENOLOGICAL CRITERIA OF DESTRUCTION	75
BOGDAN BRATSLAVETS RESTORATION OF PARTS OF AGRICULTURAL MACHINES WITH ZINC-BASED GALVANIC COATINGS	82
MYKOLA KOSIYUK COGENERATION DEVICE BASED ON INNOVATIVE TECHNOLOGY ORGANIZATION OF ORGANIC WASTE	85
YULIYA KUCHERENKO MODERN COATING TECHNOLOGIES	89
MARK ZALYUBOVSKYI, IGOR PANASYUK TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE USE OF TURBULA TYPE-EQUIPMENT EQUIPMENT IN THE PERFORMANCE OF METAL DETAILS DEPARTMENT	92
LEONID BILYI, OLEH POLISHCHUK, SVITLANA LISEVICH, ANATOLY ZALIZETSKY, VASILIIY MELNIK MODELING OF NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS ON THE BASIS OF THE SYSTEM SENSITIVITY MODEL TO ITS INITIAL CONDITIONS	99
OLEG POLISHCHUK, ANDRII POLISHCHUK, SVITLANA LISEVICH, ANATOLIY ZALIZETSKYI, VASILIIY MELNYK THE MANUFACTURING PRODUCTS AND PARTS BY 3D-PRINTING METHOD FROM COMPOSITE FILAMENTS WITH HIGH METAL CONTENT	104
OLGA YALYNA RESEARCH OF OPERATING MODES OF A PULSE HYDRAULIC DRIVE OF WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINERY	111
VASYL YANISHEVSKYY BASIC PRINCIPLES OF OPERATION AND ENERGY BALANCE OF VOLUME HYDRAULIC DRIVE	115
MYKHAILO BURBELO, DENYS LEBED, OLEKSANDR LESHCHENKO OPTIMIZATION OF CHARGE / DISCHARGE TIME OF ACTIVE FILTER CAPACITORS DURING VOLTAGE FLUCTUATIONS	119

JAROSLAV OSADCHUK, ALEXANDER OSADCHUK, VLADIMIR OSADCHUK SELF-OSCILLATING PARAMETRIC PRESSURE SENSORS	125
DMYTRO LEVKIN ARCHITECTONICS OF CALCULATED MATHEMATICAL MODELS UNDER UNCERTAINTY	135
VASIL KUTIN, MARINA KUTINA, OLEKSANDR SHPACHUK METHOD OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF INSULATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF THE GENERATOR-TRANSFORMER UNIT	138
OLEKSIY LARIN, KSENIA POTOPALSKA, YEVGEN GRINCHENKO ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE-TIME OF THE ELEMENTS OF THE CENTRIFUGAL PUMP OF THE ENERGY INSTALLATION ON THE BASIS OF STATISTICAL ASSESSMENT OF FATIGUE WITH PREDICTED WEAR DUE TO CORROSION	143
IGOR KOVTUN, SVITLANA PETRASHCHUK, JULIY BOIKO INFLUENCE OF THE SEALING ON APPEARANCE AND TRANSMISSION OF TEMPERATURE DEFORMATIONS IN ELECTRONIC MODULES	150
JULIY BOIKO, TKACHUK VITALIY, OLEKSIY POLIKAROVSKYKH, VICTOR AVDIEIEV, OLEKSIY SVISTUNOV MODELING THE CHARACTERISTICS OF A BROADBAND ANTENNA SYSTEM FOR UAV DIRECTION FINDING	158
OLEH YEVSEIENKO, PETRO KACHANOV SHOPPING MALL PREMISES SCADA-MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT	168
YURI SMOLIN DISCUSSION OF DEFINITIONS AND TERMINOLOGY PROBLEMS OF TECHNICAL CONTROL	177
LEONID BEREZIN SYSTEMATIZATION OF CALCULATIONS FOR THE RELIABILITY OF ELEMENTS OF KNITTING MECHANISMS OF SOCKS MACHINES	184
NATALIIA HIRENKO, DMYTRO KRAMARENKO RESEARCH OF DISPERSED THREE-COMPONENT SYSTEM AS A BASIS FOR STUFFED MASS WITH POULTRY MEAT AND VEGETABLE HYDROBIOTS	189
ANATOLI KARMALITA, SERHII PUNDYK, GEORGY DRAPAK, VASILIIY MELNIK ANALYSIS OF MECHANICAL METHODS OF CONTROLLING THE POSITION OF FLAT SHOE PARTS BY SURFACE PROPERTIES	194
ALLA SLAVINSKA, SERHII MATIUKH, VIKTORIIA MYTSA DIFFERENTIAL METHOD OF QUALITY CONTROL OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF KNITTED FABRIC FOR BATHING SUIT	199
VIKTOR BREDUN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL COMPONENT LOGISTICS OF MSW IN POLTAVA REGION	205
PETRO HRYTSIUK, TETIANA BABYCH, BOHDAN KRASKO CLASSIFICATION METHODS OF THE YIELD FORECASTING	209
VOLODYMYR SHCHERBAN, VALENTIN ISHCENKO, OKSANA KOLISKO, MARJANA GOLDBERG, YURIY SHCHERBAN COMPUTER IMPLEMENTATION OF DAKYSTRE'S ALGORITHM FOR DETERMINING THE FORM OF THREAD REFILLING ON THE BASIS OF SEARCHING FOR THE OPTIMAL PATH OF THE GRAPH	217
OLEKSANDR PRYGOZHEV LANGUAGE INDEPENDENT SOFTWARE CODE REPOSITORY	221
MARYNA MAMUTA, OLEKSANDR MAMUTA PERFORMANCE EVALUATION OF DUAL CHANNEL OPTOELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM WITH NEURAL NETWORK INFORMATION FUSION	229
SERHII BOYKO, VADIM SHCHOKIN, SVIATOSLAV VYSHNEVSKY, OLEXSANDER DANILIN, N. PODGORNYYKH FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION OF AVIATION ENTERPRISES DURING RECONFIGURATION OF THEIR POWER SUPPLY SYSTEM	233
OKSANA ZAKHARKEVICH, SVITLANA KULESHOVA, SERHII TKACHUK, SVITLATA LUKYANCHUK ANALYSIS OF PROSPECTS OF APPLICATION OF POLYMERIC MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF NUCLEAR PROTECTIVE CLOTHING	240
VICTOR STRELBITSKIY RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE MOVEMENT MECHANISM ON THE RESOURCE OF METAL STRUCTURES OF OVERHEAD CRANES OF SEAPORTS	249
IRYNA FINYK METHODS OF INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE IN BIOGAS REACTORS	254
OLEKSIY SHAMURATOV OBJECT CLUSTERIZATION METHOD IN PICTURES BASED ON FEATURE SELECTION	260
ANDRIY MELNYK SOFTWARE ARCHITECTURE FOR MATHEMATICAL MODELING BASED ON INTERVAL AND ONTOLOGICAL APPROACH..	265

ФРИЗ М. Є.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-8720-6479>e-mail: mykh.fryz@gmail.com

МЛИНКО Б. Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0003-0780-5365>e-mail: b.mlynko@gmail.com

УМОВНІ ЛІНІЙНІ ВИПАДКОВІ ПРОЦЕСИ З ДИСКРЕТНИМ ЧАСОМ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Умовні лінійні випадкові процеси з неперервним часом зображаються у вигляді стохастичного інтеграла від випадкового ядра за процесом із незалежними приростами. Такі процеси використовуються в задачах математичного та комп'ютерного моделювання, опрацювання стохастичних сигналів, фізична природа породження яких допускає їх представлення у вигляді суми великого числа випадкових імпульсів, які виникають у пуассонівські моменти часу. Імпульси при цьому є стохастично залежними функціями, на відміну від іншої поширеної математичної моделі – лінійного випадкового процесу, який має подібну структуру, але являє собою суму великого числа незалежних випадкових імпульсів, що виникають у пуассонівські моменти часу. Прикладними областями, де є поширеними згадані моделі є математичне, комп'ютерне моделювання та опрацювання електроенцефалографічних сигналів, кардіосигналів, процесів ресурсоспоживання, радіолокаційних сигналів та ін.

У даній роботі наведено означення умовного лінійного випадкового процесу (УЛВП) з дискретним часом, показано його зв'язок із відповідною моделлю з неперервним часом. Відповідно до наведеного означення УЛВП із дискретним часом можна трактувати як відгук лінійного цифрового фільтра з випадковими параметрами на вплив білого шуму з безмежно подільним розподілом. Проведено аналіз моментних функцій першого і другого порядку УЛВП із дискретним часом, зокрема, отримано вирази для його математичного сподівання, дисперсії та кореляційної функції.

Результати можуть бути використані для дослідження ймовірнісних характеристик досліджуваних інформаційних стохастичних сигналів, які для конкретних прикладних задач будуть залежати від властивостей відповідного ядра та породжувачого білого шуму в зображенні УЛВП. Зокрема, в роботі наведено умови, яким повинні задовольняти складові УЛВП із дискретним часом для того, щоб цей процес був стаціонарним у широкому розумінні.

Ключові слова: математична модель, умовний лінійний випадковий процес, математичне сподівання, кореляційна функція, ядро, білий шум, стаціонарний процес.

Mykhailo FRYZ, Bogdana MLYNKO
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

DISCRETE-TIME CONDITIONAL LINEAR RANDOM PROCESSES AND THEIR PROPERTIES

Continuous-time conditional linear random process is represented as a stochastic integral of a random kernel driven by a process with independent increments. Such processes are used in the problems of mathematical modelling, computer simulation, and processing of stochastic signals, the physical nature of which generates them to be represented as the sum of many random impulses that occur at Poisson moments. Impulses are stochastically dependent functions, in contrast to another well-known mathematical model which is a linear random process, that has a similar structure but is represented as the sum of a large amount of independent random impulses that occur at Poisson moments of time. The application areas of these models are mathematical modelling, computer simulation, and processing of electroencephalographic signals, cardio signals, resource consumption processes (such as electricity consumption, water consumption, gas consumption), radar signals, etc.

A discrete-time conditional linear random process has been defined in the paper, the relationships with corresponding continuous-time model has been shown. According to the given definition the discrete-time conditional linear random process can be considered as an output of linear digital filter with random parameters on the input of the white noise which is infinitely divisible distributed. Moment functions of first and second order have been analyzed. In particular, the expressions for mathematical expectation, variance and covariance function have been obtained.

The results can be utilized to study the probabilistic characteristics of the investigated information stochastic signals, which will depend on the properties of the corresponding kernel and white noise. In particular, the conditions for the process to be wide-sense stationary have been represented.

Keywords: mathematical model, conditional linear random process, mathematical expectation, covariance function, kernel, white noise, stationary process.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Обґрунтування математичної моделі є одним із основних етапів розробки сучасних інформаційних систем та технологій, побудованих на основі методів опрацювання сигналів. Серед моделей стохастичних сигналів поширеними є лінійні випадкові процеси, методологія використання яких для теоретичних та прикладних задач є добре відомою [1–3]. Узагальненням лінійної моделі є умовні лінійні випадкові процеси (УЛВП), які використовуються для задач математичного моделювання сигналів, представлених у вигляді суми великого числа стохастично залежних випадкових імпульсів (на відміну від лінійних моделей, де ці

імпульси є незалежними), що виникають у пуассонівські моменти часу [4–6]. Прикладними областями, де є поширеними згадані моделі є, зокрема, математичне, комп'ютерне моделювання та опрацювання електроенцефалографічних сигналів, кардіосигналів, процесів ресурсоспоживання, радіолокаційних сигналів та ін [4, 7–9].

При здійсненні статистичного аналізу випадкових сигналів із використанням цифрових обчислювальних засобів, які входять до складу інформаційних систем, використовується варіант моделі УЛВП з дискретним часом. Розвиток методології математичного моделювання з використанням УЛВП, аналізу їх ймовірнісних властивостей, а також побудова методів їх статистичного аналізу та прогнозування у інформаційних системах є актуальною науково-прикладною проблемою.

Аналіз досліджень та публікацій

УЛВП з неперервним часом вперше було означено у роботі [4] стосовно задачі математичного моделювання радіолокаційних сигналів. Теоретичні та прикладні аспекти моделі УЛВП з неперервним часом розглянуто у роботах [4–10]. Зокрема, в [5] здійснено аналіз в рамках кореляційної теорії, в [6, 10] отримано вирази для характеристичної функції УЛВП, а також розглянуто загальну методологію математичного моделювання стохастичних сигналів на основі умовних лінійних випадкових процесів, включаючи обґрунтування стаціонарності та стохастичної періодичності. Застосування до прикладних задач у технічних та медичних системах наведено, зокрема, у роботах [4, 7–9].

Умовний лінійний випадковий процес з дискретним часом вперше проаналізовано в [4], де він означений у вигляді стохастичної суми зі стаціонарним породжуючим білим шумом. Автор [4] наводить результати щодо умов, за яких для УЛВП з дискретним часом справедливою є центральна гранична теорема.

У низці робіт вивчаються граничні теореми (центральна гранична теорема, закон великих чисел) стосовно випадкових послідовностей, які мають структуру, подібну до УЛВП з дискретним часом: випадково зважені суми випадкових величин [11–13], лінійні процеси з випадковими коефіцієнтами [14] (вивчаються функціональні граничні теореми).

В роботі [15] автори аналізують властивості частинного випадку моделі УЛВП, а саме, стаціонарної послідовності ковзної суми з випадковими коефіцієнтами. Охарактеризовано основні властивості, зокрема, наведено вирази для математичного сподівання та кореляційної функції стаціонарної послідовності.

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити висновок про відсутність загального підходу щодо означення поняття УЛВП з дискретним часом, аналізу їх ймовірнісних розподілів, зв'язку із УЛВП із неперервним часом.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є формулювання означення умовного лінійного випадкового процесу з дискретним часом із врахуванням його взаємозв'язку з відповідною моделлю неперервного часу, встановлення умов існування відповідного стохастичного ряду, отримання виразів для математичного сподівання, дисперсії та кореляційної функції моделі у загальному випадку, що дасть можливість встановити умови, за яких досліджуваний процес є стаціонарним у широкому розумінні.

Виклад основного матеріалу

Умовним лінійним випадковим процесом (з неперервним часом) $\xi(\omega, t)$, $\omega \in \Omega$, $t \in (-\infty, \infty)$, заданим на деякому ймовірнісному просторі $\{\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}\}$, називається стохастичний інтеграл виду [5, 6, 10]:

$$\xi(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\omega, \tau, t) d\eta(\omega, \tau), \quad (1)$$

де $\varphi(\omega, \tau, t)$, $\tau, t \in (-\infty, \infty)$ – дійсна *випадкова* функція (ядро); $\eta(\omega, \tau)$, $\tau \in (-\infty, \infty)$, $\mathbf{P}(\eta(\omega, 0) = 0) = 1$ – дійсний гільбертовий стохастично неперервний породжуючий випадковий процес із незалежними приростами; випадкові функції $\varphi(\omega, \tau, t)$ і $\eta(\omega, \tau)$ є *стохастично незалежними*.

Дійсним умовним лінійним випадковим процесом із дискретним часом $\xi_t(\omega)$, $t \in \mathbf{Z}$, $\omega \in \Omega$ називається випадкова послідовність виду:

$$\xi_t(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \varphi_{\tau,t}(\omega) \zeta_{\tau}(\omega), \quad (2)$$

де $\varphi_{\tau,t}(\omega)$, $t, \tau \in \mathbf{Z}$ – дійсна *випадкова* функція (ядро умовного лінійного випадкового процесу); $\zeta_{\tau}(\omega)$, $\tau \in \mathbf{Z}$ – гільбертова послідовність дійсних безмежно подільних незалежних випадкових величин (безмежно подільний білий шум з дискретним часом); випадкові функції $\varphi_{\tau,t}(\omega)$ і $\zeta_{\tau}(\omega)$ є стохастично незалежними за означенням.

Позначимо математичне сподівання та дисперсію білого шуму $\zeta_\tau(\omega)$ наступним чином:
 $\mathbf{M}\zeta_\tau(\omega) = a_\tau < \infty$, $\mathbf{D}\zeta_\tau(\omega) = \sigma_\tau^2 < \infty$, $\forall \tau$. Змінну ω будемо далі для спрощення позначень опускати.

Якщо в задачах математичного моделювання інформаційних сигналів потрібно показати взаємозв'язок моделей УЛВП з неперервним та дискретним часом, то це можна зробити наступним чином.

Відповідно до побудови стохастичного інтеграла [6], $\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau) = \lim_{\substack{a \rightarrow -\infty \\ b \rightarrow \infty}} \int_a^b \varphi(\tau, t) d\eta(\tau)$,

крім того $\int_a^b \varphi(\tau, t) d\eta(\tau)$ можна зобразити як границю в середньоквадратичному розумінні послідовності інтегральних сум виду:

$$I_n(t) = \sum_{i=1}^n \varphi(\tilde{\tau}_i, t) \Delta\eta(\tau_i), \quad (3)$$

де $a = \tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n = b$, $\Delta\eta(\tau_i) = \eta(\tau_i) - \eta(\tau_{i-1})$, $\tilde{\tau}_i \in [\tau_{i-1}, \tau_i]$, $i = \overline{1, n}$.

Тобто, якщо $\max_{i=\overline{1, n}} (\tau_i - \tau_{i-1}) \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \varphi(\tilde{\tau}_i, t) \Delta\eta(\tau_i) = \int_a^b \varphi(\tau, t) d\eta(\tau)$.

Виберемо тепер $\tau_i = i\Delta t$, $\tilde{\tau}_i = \tau_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots$, $t_k = k\Delta t$, $k \in \mathbf{Z}$ (де Δt – крок дискретизації за часом) і позначимо $\varphi(\tau_{i-1}, t_k) = \varphi_{i,k}$, $\Delta\eta(\tau_i) = \zeta_i$ (приріст процесу з незалежними приростами $\eta(\tau)$ на інтервалі $[\tau_{i-1}, \tau_i]$), тоді (3) запишемо як

$$I_{n,k} = \sum_{i=1}^n \varphi_{i,k} \zeta_i.$$

Зрозуміло, що ζ_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ – незалежні випадкові величини (бо вони є приростами процесу з незалежними приростами), а також ζ_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ – безмежно подільні випадкові величини.

Нехай тепер $n \rightarrow \infty$, але при цьому $(\tau_i - \tau_{i-1}) = \Delta t$, $i = \overline{1, n}$, але $a \rightarrow -\infty$, $b \rightarrow \infty$. Якщо при цьому існує границя в середньоквадратичному розумінні послідовності $I_{n,k} = \sum_{i=1}^n \varphi_{i,k} \zeta_i$, то будемо писати

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ a \rightarrow -\infty \\ b \rightarrow \infty}} I_{n,k} = \xi_k = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \varphi_{i,k} \zeta_i, \quad k \in \mathbf{Z}, \quad (4)$$

тобто отримаємо випадкову послідовність (2).

Питання близькості розподілів випадкових послідовностей $\xi_k = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \varphi_{i,k} \zeta_i$ та

$\xi(t_k) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t_k) d\eta(\tau)$ виходить за межі даної роботи.

Ймовірнісні характеристики УЛВП з дискретним часом можна отримати, використовуючи методи, подібні до тих, що були застосовані для аналізу УЛВП з неперервним часом в роботах [5, 6, 10]. Тому далі наведемо лише основні результати.

Перш за все, зауважимо, що ряд (2) збігається у середньоквадратичному розумінні тоді і тільки тоді, коли виконується наступна умова:

$$\mathbf{M}\xi_t^2 = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}(\varphi_{\tau,t} \varphi_{s,t}) a_\tau a_s + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}(\varphi_{\tau,t}^2) \sigma_\tau^2 < \infty. \quad (5)$$

Якщо $\varphi_{\tau,t}$ – детермінована функція, то ξ_t – лінійний випадковий процес з дискретним часом [1, 2].

Математичне сподівання УЛВП з дискретним часом дорівнює:

$$\mathbf{M}\xi_t = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}\varphi_{\tau,t} a_{\tau}. \quad (6)$$

Кореляційна функція $R_{t_1,t_2} = \mathbf{M}\left[\left(\xi_{t_1} - \mathbf{M}\xi_{t_1}\right)\left(\xi_{t_2} - \mathbf{M}\xi_{t_2}\right)\right]$, має вигляд:

$$R_{t_1,t_2} = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}\left(\overset{\circ}{\varphi}_{\tau,t_1} \overset{\circ}{\varphi}_{s,t_2}\right) a_{\tau} a_s + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}\left(\varphi_{\tau,t_1} \varphi_{\tau,t_2}\right) \sigma_{\tau}^2, \quad t_1, t_2 \in \mathbf{Z}, \quad (7)$$

де $\overset{\circ}{\varphi}_{\tau,t} = \varphi_{\tau,t} - \mathbf{M}\varphi_{\tau,t}$ – центроване ядро УЛВП з дискретним часом.

З (7) отримаємо вираз для дисперсії УЛВП з дискретним часом:

$$\mathbf{D}\xi_t = R_{t,t} = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}\left(\overset{\circ}{\varphi}_{\tau,t} \overset{\circ}{\varphi}_{s,t}\right) a_{\tau} a_s + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \mathbf{M}\varphi_{\tau,t}^2 \sigma_{\tau}^2. \quad (8)$$

Позначимо $\phi_{\tau,t} = \mathbf{M}\varphi_{\tau,t}$ – математичне сподівання ядра УЛВП з дискретним часом, а

$$R_{\tau,s;t_1,t_2}^{\varphi} = \mathbf{M}\left(\overset{\circ}{\varphi}_{\tau,t_1} \overset{\circ}{\varphi}_{s,t_2}\right) – \text{кореляційна функція ядра.}$$

Отримані вирази для математичного сподівання та кореляційної функції УЛВП з дискретним часом можна використовувати для обґрунтування ймовірнісних властивостей моделі, які в конкретних прикладних задачах залежать від особливостей ядра і породжуючого білого шуму. Зокрема, нижче встановлено умови, за яких УЛВП з дискретним часом буде стаціонарним у широкому розумінні.

Твердження. Якщо ξ_{τ} , $\tau \in \mathbf{Z}$ – послідовність однаково розподілених незалежних випадкових величин з математичним сподіванням $\mathbf{M}\xi_{\tau} = a$ і дисперсією $\mathbf{D}\xi_{\tau} = \sigma^2$, а математичне сподівання та кореляційна функція ядра $\varphi_{\tau,t}$ задовольняють умовам

$$\phi_{\tau,t} = \phi_{t-\tau}, \quad R_{\tau,s;t_1,t_2}^{\varphi} = R_{\tau+t,s+t;t_1+t,t_2+t}^{\varphi}, \quad \forall t \in \mathbf{Z}, \quad (9)$$

то УЛВП (2) є стаціонарною у широкому сенсі випадковою послідовністю, тобто $\mathbf{M}\xi_t = \text{const}$ і $R_{t_1,t_2} = R_{t_2-t_1}$.

Дійсно, враховуючи наведене вище можемо написати:

$$\mathbf{M}\xi_t = a \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi_{t-\tau} = a \sum_{s=-\infty}^{\infty} \phi_s = \text{const}.$$

Враховуючи, що $\mathbf{M}\left(\varphi_{\tau,t_1} \varphi_{\tau,t_2}\right) = R_{\tau,\tau;t_1,t_2}^{\varphi} + \phi_{\tau,t_1} \phi_{\tau,t_2}$, можемо записати:

$$\begin{aligned} R_{t_1,t_2} &= a^2 \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} R_{\tau+t,s+t;t_1+t,t_2+t}^{\varphi} + \sigma^2 \left(\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_{\tau+t,\tau+t;t_1+t,t_2+t}^{\varphi} + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi_{t_1-\tau} \phi_{t_2-\tau} \right) = \\ &= a^2 \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} R_{\tau,s;t_2-t_1}^{\varphi} + \sigma^2 \left(\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_{\tau,\tau;t_2-t_1}^{\varphi} + \sum_{s=-\infty}^{\infty} \phi_s \phi_{t_2-t_1+s} \right) = R_{t_2-t_1}. \end{aligned}$$

Отже, в умовах даного твердження, математичне сподівання процесу не залежить від часу, а його кореляційна функція залежить лише від різниці своїх аргументів, тому УЛВП є стаціонарним в широкому сенсі.

Висновки

У роботі наведено означення умовного лінійного випадкового процесу з дискретним часом, показано взаємозв'язок із відповідною моделлю з неперервним часом. Обґрунтовано вирази для математичного сподівання, дисперсії та кореляційної функції УЛВП з дискретним часом, що дало можливість охарактеризувати умови, за яких процес буде стаціонарним у широкому сенсі. На основі наведених співвідношень можна також встановити умови, яким повинні задовольняти ядро та породжуючий білий шум зображення УЛВП з дискретним часом для того, щоб процес був періодично корельованим, що є важливим для задач математичного моделювання циклостационарних сигналів.

Література

1. Babak V. P. Methods and Models for Information Data Analysis / V. P. Babak, S. V. Babak, A. O. Zaporozhets, M. V. Myslovych, V. M. Zvaritch // Diagnostic Systems For Energy Equipments, volume 281 of Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham, 2020. – P. 23–70. – DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
2. Фриз М. Е. Эргодические свойства линейных процессов в задачах математического моделирования и статистического анализа случайных сигналов / М. Е. Фриз, Л. Н. Щербак // Электронное моделирование. — К.: Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины, 2010. — Т. 32. — № 1. — С. 3–14.
3. Фриз М. Є. Властивість перемішування та ергодичність лінійних процесів у задачах математичного моделювання та статистичного аналізу випадкових сигналів / М. Є. Фриз, Л. М. Щербак // Моделювання та інформаційні технології: збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. — К., 2009. — Вип. 51. — С. 53–57.
4. Pierre P. A. Central Limit Theorems for Conditionally Linear Random Processes / P. A. Pierre // SIAM J. of Applied Math. — 1971. — Vol. 20, № 3. — P. 449–461. – DOI: http://doi.org/10.1137/0120048
5. Фриз М. Є. Властивості умовних лінійних процесів та їх застосування в прикладних задачах математичного моделювання стохастичних сигналів / М. Є. Фриз // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 6. – С. 228–238.
6. Fryz M. Characteristic Function of Conditional Linear Random Process / M. Fryz, L. Scherbak, M. Karpinski, B. Mlynko // Proceedings of the 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems. – Ternopil, Ukraine, 2021. – С. 129–135.
7. Фриз М. Є. Статистичний аналіз періодичної авторегресії з випадковими коефіцієнтами в задачах оперативного прогнозування електроспоживання підприємств / М. Є. Фриз, Л. М. Щербак // Технічна електродинаміка. – К.: Інститут електродинаміки Національної академії наук України, 2019. – Вип. 2. – С. 38–47. – DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.02.038
8. Fryz M. Conditional linear random process and random coefficient autoregressive model for EEG analysis / M. Fryz // Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. – Kyiv Ukraine, 2017. – P. 305–309. – DOI:10.1109/UKRCON.2017.8100498
9. Iwankiewicz R. Dynamic response of mechanical systems to impulse process stochastic excitations: Markov approach / R. Iwankiewicz // Journal of Physics: Conference Series, 2016.
10. Fryz M., Mlynko B. Properties of Stationarity and Cyclostationarity of Conditional Linear Random Processes / M. Fryz, B. Mlynko // Proceedings of the 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – Lviv, Slavske, Ukraine, 2020. – P. 166–170. – DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235415
11. Chen P. Strong laws for randomly weighted sums of random variables and applications in the bootstrap and random design regression / P. Chen, T. Zhang, S. H. Sung // Statistica Sinica. – 2019. – Vol. 29, No. 4. – P. 1739–1749. – DOI: 10.5705/ss.202017.0106
12. Vasudeva R. Limit Theorems for randomly weighted sums of random variables / R. Vasudeva // ProbStat Forum. – 2018. – Volume 11. – P. 8–18.
13. Kevei P. The asymptotic distribution of randomly weighted sums and self-normalized sums / P. Kevei, D. Mason // Electron. J. Probab. – 2012. – Vol. 17. – P. 1–21. – DOI: 10.1214/EJP.v17-2092
14. Krizmanic D. Maxima of linear processes with heavy-tailed innovations and random coefficients / D. Krizmanic // J. Time Ser. Anal. – 2022. – Volume 43, Issue2. – P. 238–262.
15. Marek T. On invertibility of a random coefficient moving average model / T. Marek // Kybernetika. – 2005. – Vol. 41, No. 6. – P. 743–756.

References

1. Babak V. P. Methods and Models for Information Data Analysis / V. P. Babak, S. V. Babak, A. O. Zaporozhets, M. V. Myslovych, V. M. Zvaritch // Diagnostic Systems For Energy Equipments, volume 281 of Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham, 2020. – P. 23–70. – DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
2. Fryz M. Ergodic properties of linear processes in problems of random signal mathematical modelling and statistical analysis / M. Fryz, L. Scherbak // Electronic Modeling. - 2010. - V. 32. – No.1. – PP. 3 – 14.
3. Fryz M. Mixing property and ergodicity of linear processes in the problems of random signal mathematical modelling and statistical analysis / M. Fryz, L. Scherbak // Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii : zbirnyk naukovykh prats Instytutu problem modeliuvannia v enerhetytsi im. H. Ye. Pukhova NAN Ukrainy. — K., 2009. — Vol. 51. — PP. 53–57.
4. Pierre P. A. Central Limit Theorems for Conditionally Linear Random Processes / P. A. Pierre // SIAM J. of Applied Math. — 1971. — Vol. 20, № 3. — P. 449–461. – DOI: http://doi.org/10.1137/0120048
5. Fryz M. Properties of conditional linear random processes and their applications in the applied problems of stochastic signal mathematical modelling / M. Fryz // Matematychnе ta kompiutерne modeliuvannia. Seriia: Tekhnichni nauky: zbirnyk naukovykh prats, 2012. - Vol. 6. - P.228–238. doi: https://doi.org/10.32626/2308-5916.2012-6.228-238
6. Fryz M. Characteristic Function of Conditional Linear Random Process / M. Fryz, L. Scherbak, M. Karpinski, B. Mlynko // Proceedings of the 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems. – Ternopil, Ukraine, 2021. – С. 129–135.
7. Fryz M. Statistical analysis of random coefficient periodic autoregression and its application for short-term electricity consumption forecasting / M. Fryz, L. Scherbak // Tekhnichna elektrodynamika. – K.: Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, 2019. – Vol. 2. – PP. 38 – 47. doi: https://doi.org/10.15407/techned2019.02.038

-
8. Fryz M. Conditional linear random process and random coefficient autoregressive model for EEG analysis / M. Fyz // Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. – Kyiv Ukraine, 2017. – P. 305–309. – DOI:10.1109/UKRCON.2017.8100498
 9. Iwankiewicz R. Dynamic response of mechanical systems to impulse process stochastic excitations: Markov approach / R. Iwankiewicz // Journal of Physics: Conference Series, 2016.
 10. Fryz M., Mlynko B. Properties of Stationarity and Cyclostationarity of Conditional Linear Random Processes / M. Fryz, B. Mlynko // Proceedings of the 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – Lviv, Slavske, Ukraine, 2020. – P. 166–170. – DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235415
 11. Chen P. Strong laws for randomly weighted sums of random variables and applications in the bootstrap and random design regression / P. Chen, T. Zhang, S. H. Sung // Statistica Sinica. – 2019. – Vol. 29, No. 4. – P. 1739–1749. – DOI: 10.5705/ss.202017.0106
 12. Vasudeva R. Limit Theorems for randomly weighted sums of random variables / R. Vasudeva // ProbStat Forum. – 2018. – Volume 11. – P. 8–18.
 13. Kevei P. The asymptotic distribution of randomly weighted sums and self-normalized sums / P. Kevei, D. Mason // Electron. J. Probab. – 2012. – Vol. 17. – P. 1–21. – DOI: 10.1214/EJP.v17-2092
 14. Krizmanić D. Maxima of linear processes with heavy-tailed innovations and random coefficients / D. Krizmanić // J. Time Ser. Anal. – 2022. – Volume 43, Issue2. – P. 238–262.
 15. Marek T. On invertibility of a random coefficient moving average model / T. Marek // Kybernetika. – 2005. – Vol. 41, No. 6. – P. 743–756.

ГНАТЧУК Є. Г.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2989-3183>e-mail: liza_veta@ukr.net

ПРАВИЛА І МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ДОНОРСТВА І ТРАНСПЛАНТАЦІЇ НА ОСНОВІ ЦИВІЛЬНОГО ПРАВА

Розроблені методи підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права унеможливають прийняття некоректних (неправомірних) рішень щодо можливості/неможливості донорства та/або трансплантації. Використання розроблених методів підвищує рівень коректності прийнятих рішень щодо донорства та щодо трансплантації. Ці методи забезпечують можливість персоналу клінік, які займаються трансплантаціями, коректно формувати Реєстри донорів (прижиттєвих та посмертних) та Списки осіб на трансплантацію (від прижиттєвих та посмертних донорів або від виключно посмертних донорів) з врахуванням всіх діючих наразі цивільно-правових підстав. Розроблені методи стандартизують процедуру включення донорів до Реєстру та реципієнтів до Списку на трансплантацію, зводячи до мінімуму вплив суб'єктивізму та людського фактору при цьому.

Майбутній модуль підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права Єдиної державної інформаційної системи трансплантації органів і тканин, побудований на основі розроблених методів, уможливить швидку та автоматичну перевірку всіх цивільно-правових підстав для внесення особи в Реєстр донорів або Список осіб на трансплантацію відповідно; ухвалення безпомилкових (з точки зору цивільно-правових підстав) рішень про донорство і трансплантацію; мінімізацію впливу суб'єктивізму та людського фактору при ухваленні рішень щодо можливості/неможливості донорства та трансплантації.

Ключові слова: підтримка прийняття рішень, правила, донорство, трансплантація, Єдина державна інформаційна система трансплантації органів і тканин (ЄДІСТ).

Yelyzaveta HNATCHUK
Khmelnytskyi National University

RULES AND METHOD OF SUPPORTING THE DECISION MAKING ABOUT THE POSSIBILITY OF DONATION AND TRANSPLANTATION BASED ON THE CIVIL LAW

Today in Ukraine the problem of transplantation of organs and other anatomical materials to humans is very acute. Every year, thousands of Ukrainians need organ transplants to save their lives, but there are only a few transplant surgeries. In developed countries, organ transplantation is the standard of care for many diseases of the kidneys, heart, liver, lungs and others. Among the reasons hindering the development of transplantation of anatomical materials to humans in Ukraine is the unpreparedness of the Unified State Information System for Organ and Tissue Transplantation (USIST).

According to the author, the functioning of USIST will not be complete without a successfully developed and implemented module of supporting the decision making about the possibility of donation and transplantation based on the civil law, which will help decide on the possibility or impossibility of donation and transplantation in a given case considering civil law grounds.

Developed methods of supporting the decision making about the possibility of donation and transplantation based on the civil law make it impossible to make incorrect (illegal) decisions on the possibility/impossibility of donation and/or transplantation. The use of the developed methods increases the level of correctness of the decisions made regarding donation and transplantation.

Thus, the module of supporting the decision making about the possibility of donation and transplantation based on the civil law of the USIST will allow: rapid and automatic verification of all civil legal grounds for inclusion in the Register of Donors or the List of persons for transplantation, respectively; making unmistakable (from the point of view of civil law) decisions on donation and transplantation; minimizing the influence of subjectivity and the human factor in making decisions about the possibility/impossibility of donation and transplantation. Therefore, an important and urgent task now is the implementation of the designed module of supporting the decision making about the possibility of donation and transplantation based on the civil law.

Keywords: supporting the decision, rules, donation, transplantation, Unified State Information System for Organ and Tissue Transplantation.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У наш час трансплантація органів та (або) тканин людини є дієвим і, зазвичай, єдиним засобом порятунку життя і відновлення здоров'я. Його використовують у всьому цивілізованому світі, коли медикаментозні або хірургічні методи лікування неможливі, однак, пацієнт має потенціал до подальшої здорової активності.

Згідно з Законом України «Про застосування трансплантації анатомічних матеріалів людини» [1], трансплантація – це спеціальний метод лікування, що полягає в пересадці реципієнту органу або іншого анатомічного матеріалу, взятих у людини чи у тварини. Донорство – це добровільна передача крові та інших органів людини для того, щоб допомогти іншим людям вилікуватися і вижити [1]. Існує 2 види донорства: посмертне (за згодою особи за життя або членів сім'ї після її смерті) і прижиттєве (за згодою донора).

Україна відстає на 20–25 років у розвитку органної трансплантації через відсутність фінансування на розвиток системи трансплантації, відсутність єдиного реєстру донорів, співвідношення презумпції згоди і

незгоди, перспективи розвитку трансплант-координаційної служби, проблеми навчання та підготовки лікарів, відсутність єдиного електронного реєстру тощо [2].

Згідно з Законом України «Про застосування трансплантації анатомічних матеріалів людині» [1], трансплантологічна діяльність має базуватися виключно на основі Єдиної державної інформаційної системи трансплантації органів і тканин (ЄДІСТ).

Проведений у [3] аналіз відомих методів та рішень показав, що ані відомі інформаційні системи в галузі донорства і трансплантології, ані відомі системи для галузі медичного права не пропонують правил, методу та модуля підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права.

На думку автора, *актуальним* для ЄДІСТ може стати успішно розроблений та впроваджений модуль підтримки прийняття рішення щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права, який допоможе прийняти рішення щодо можливості або неможливості донорства та трансплантації в тому чи іншому випадку з врахуванням цивільно-правових підстав. Теоретичним підґрунтям для такого модуля мають стати правила і метод підтримки прийняття рішення щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права, розроблення яких і є *метою даного дослідження*.

Правила та метод підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права

Аналіз предметної галузі цивільного права щодо можливості донорства і трансплантації, проведений у [3], показав, що *для можливості проведення посмертного донорства мають бути виконані наступні умови*:

1) (наявна згода повнолітньої дієздатної Особи-потенційного донора на вилучення органів після смерті) або (відсутня незгода повнолітньої дієздатної Особи-потенційного донора стати донором після смерті) та (наявна згода членів сім'ї після смерті повнолітньої дієздатної Особи-потенційного донора (чоловіка/дружини, дітей, батьків, рідних братів та сестер) на вилучення органів після смерті) або (наявна згода законних представників неповнолітньої Особи-потенційного донора на вилучення органів після смерті) або (наявна згода законних представників недієздатної, обмеженої в дієздатності Особи-потенційного донора на вилучення органів після смерті);

2) Особа-потенційний донор не є дитиною-сиротою;

3) Особа-потенційний донор не є ветераном АТО та/або ООС;

4) встановлено особу Особи-потенційного донору;

5) проти донорства Особи-потенційного донора не виступають правоохоронці та/або судмедексперт та/або суд;

6) (відбулось повне і незворотне припинення всіх функцій головного мозку Особи-потенційного донора (при працюючому серці та штучній вентиляції легень), засвідчене консиліумом лікарів, до якого не входили лікарі, що братимуть участь у вилученні анатомічних матеріалів та їх трансплантації, а також не входив трансплант-координатор закладу охорони здоров'я) або (відбулось незворотне припинення кровообігу та дихальних функцій і з'явилися ранні та/або пізні трупні зміни в Особи-потенційного донора).

Аналіз предметної галузі цивільного права щодо можливості донорства і трансплантації, проведений у [3], показав, що *для можливості проведення прижиттєвого донорства мають бути виконані наступні умови*:

1) (наявна згода повнолітньої дієздатної Особи-потенційного донора на вилучення її органу (дозволеного до трансплантації МОЗ України одного з парних органів або частини органу) за життя) або (наявна згода законних представників неповнолітньої Особи-потенційного донора на вилучення її органу (дозволеного до трансплантації МОЗ України одного з парних органів або частини органу) за життя) або (наявна згода законних представників недієздатної, обмеженої в дієздатності Особи-потенційного донора на вилучення її органу (дозволеного до трансплантації МОЗ України одного з парних органів або частини органу) за життя);

2) завдана при трансплантації шкода Особи-потенційному донору є меншою, ніж та, що загрожувала реципієнту;

3) Особа-потенційний донор не є вагітною жінкою;

4) Особа-потенційний донор не є іноземцем або особою без громадянства, яка незаконно перебуває на території України;

5) Особа-потенційний донор не страждає на тяжкі психічні розлади;

6) Особа-потенційний донор не має захворювань, що можуть передатись реципієнту;

7) Особа-потенційний донор не утримується в місцях позбавлення волі;

8) Особа-потенційний донор не надавала раніше орган або його частину на трансплантацію;

9) в Особи-потенційного донора вилучатиметься (з метою подальшої трансплантації) виключно один з парних органів або частина органа або частина тканини;

10) проти донорства Особи-потенційного донора не виступають правоохоронці та/або судмедексперт та/або суд.

Дерево рішень щодо можливості донорства на основі цивільного права представлено на рис. 1.

Аналіз предметної галузі цивільного права щодо можливості донорства і трансплантації, проведений у [3], показав, що для можливості проведення трансплантації мають бути виконані наступні умови:

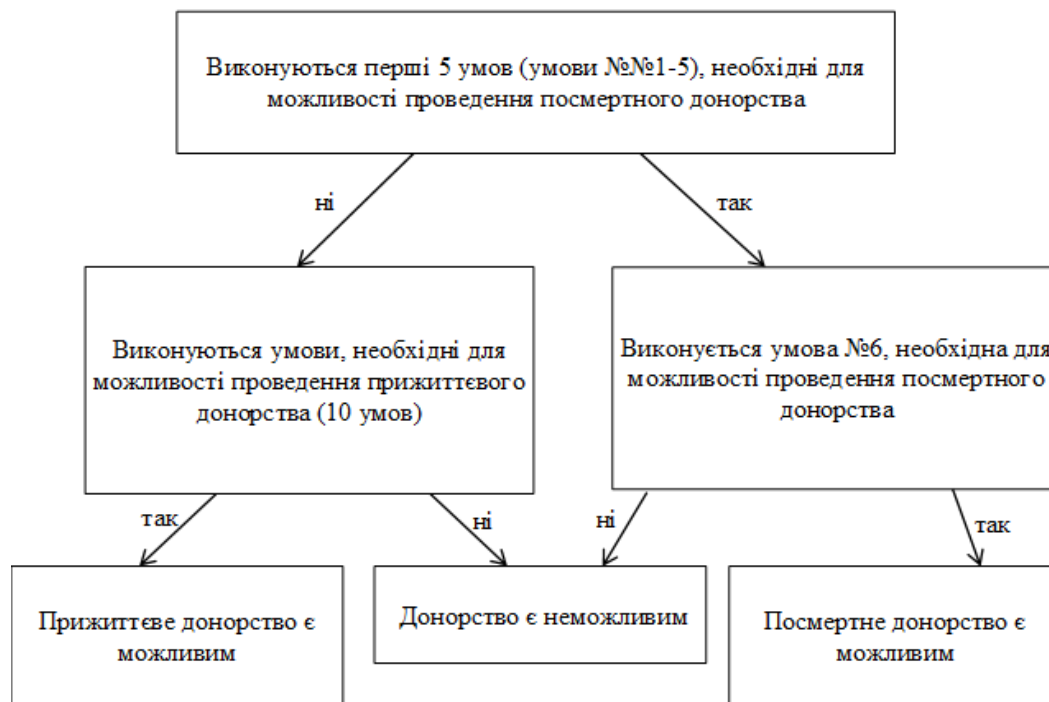


Рис. 1. Дерево рішень щодо можливості донорства на основі цивільного права

1) Особа-реципієнт має таке захворювання, що неможливо зберегти життя та/або відновити її здоров'я іншими (відмінними від трансплантації) методами лікування;

2) наявність у Особи-реципієнта медичних показань для застосування трансплантації встановив консилиум лікарів;

3) (наявна письмова згода повнолітньої Особи-реципієнта) або ((наявна письмова згода Особи-реципієнта віком від 15 до 18 років) та (наявна письмова згода батьків або інших законних представників Особи-реципієнта віком від 15 до 18 років)) або (наявна письмова згода батьків або інших законних представників Особи-реципієнта віком до 15 років) або (має місце невідкладний випадок з існуванням реальної загрози життю Особи-реципієнта);

4) Особа-реципієнт потребує органу або тканини, трансплантація якого дозволена МОЗ України;

5) майбутню трансплантацію буде проводити заклад охорони здоров'я або наукова установа, яка має право її проводити.

На основі визначених умов, необхідних для можливості проведення прижиттєвого та посмертного донорства, а також умов, необхідних для можливості проведення трансплантації, розроблено 23 правила підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства на основі цивільного права та 6 правил підтримки прийняття рішень щодо можливості трансплантації на основі цивільного права [3].

Метод підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства на основі цивільного права схематично представлений на рис. 2.

Метод підтримки прийняття рішень щодо можливості трансплантації на основі цивільного права схематично представлений на рис. 3.

Приклад використання майбутнього модуля підтримки прийняття рішення щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права у Єдиній державній інформаційній системі трансплантації органів і тканин наведено на рис. 4.

Розроблені методи підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права забезпечили можливість виконувати швидку перевірку всіх цивільно-правових підстав для внесення особи в Реєстр донорів або Список осіб на трансплантацію відповідно. Така перевірка дозволяє ухвалювати безпомилкові (з точки зору цивільно-правових підстав) рішення про донорство і трансплантацію. Враховуючи серйозність таких рішень, для їх прийняття потрібно мінімізувати вплив суб'єктивізму та людського фактору, що також забезпечують розроблені методи.

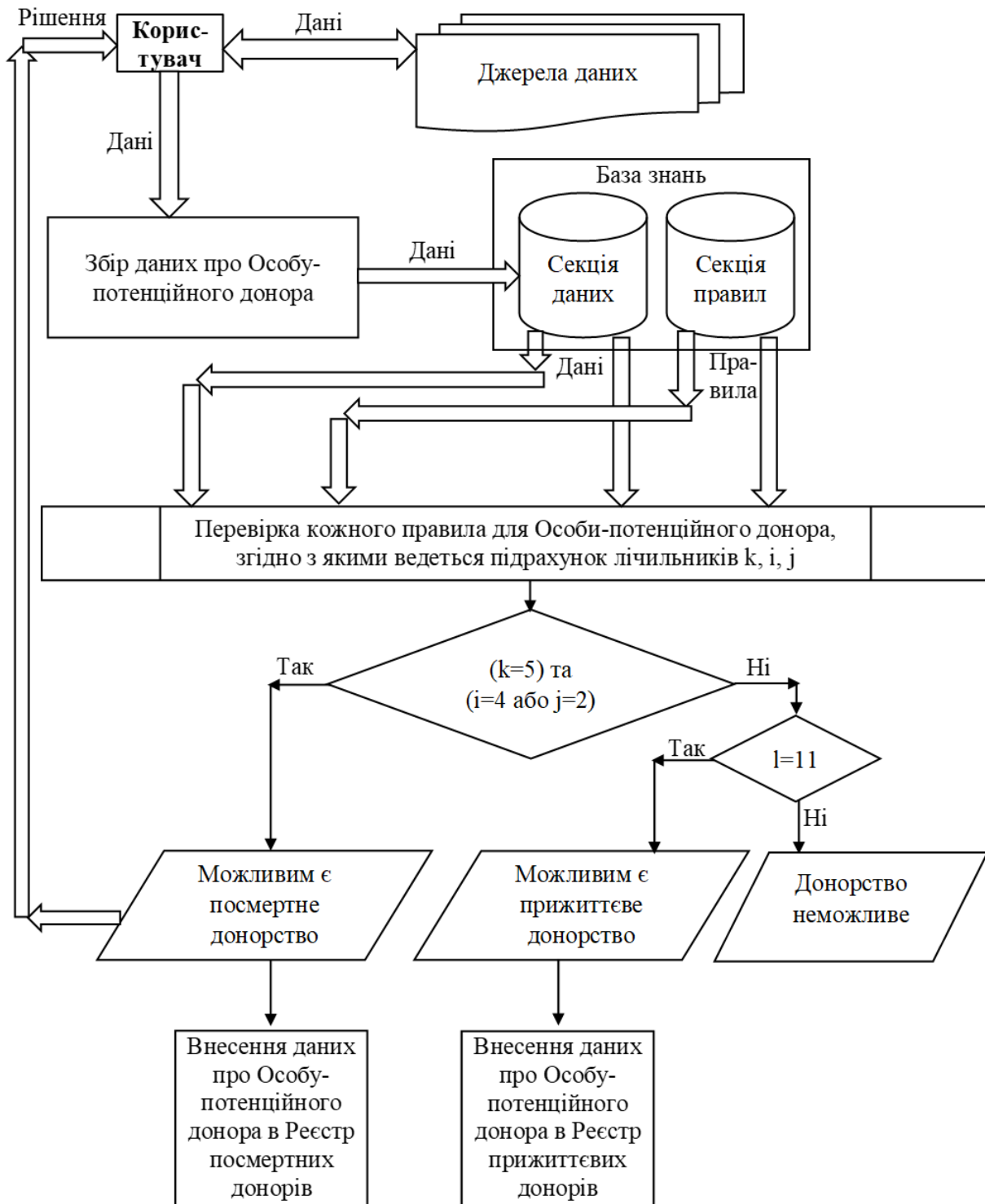


Рис. 2. Схема методу підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства на основі цивільного права

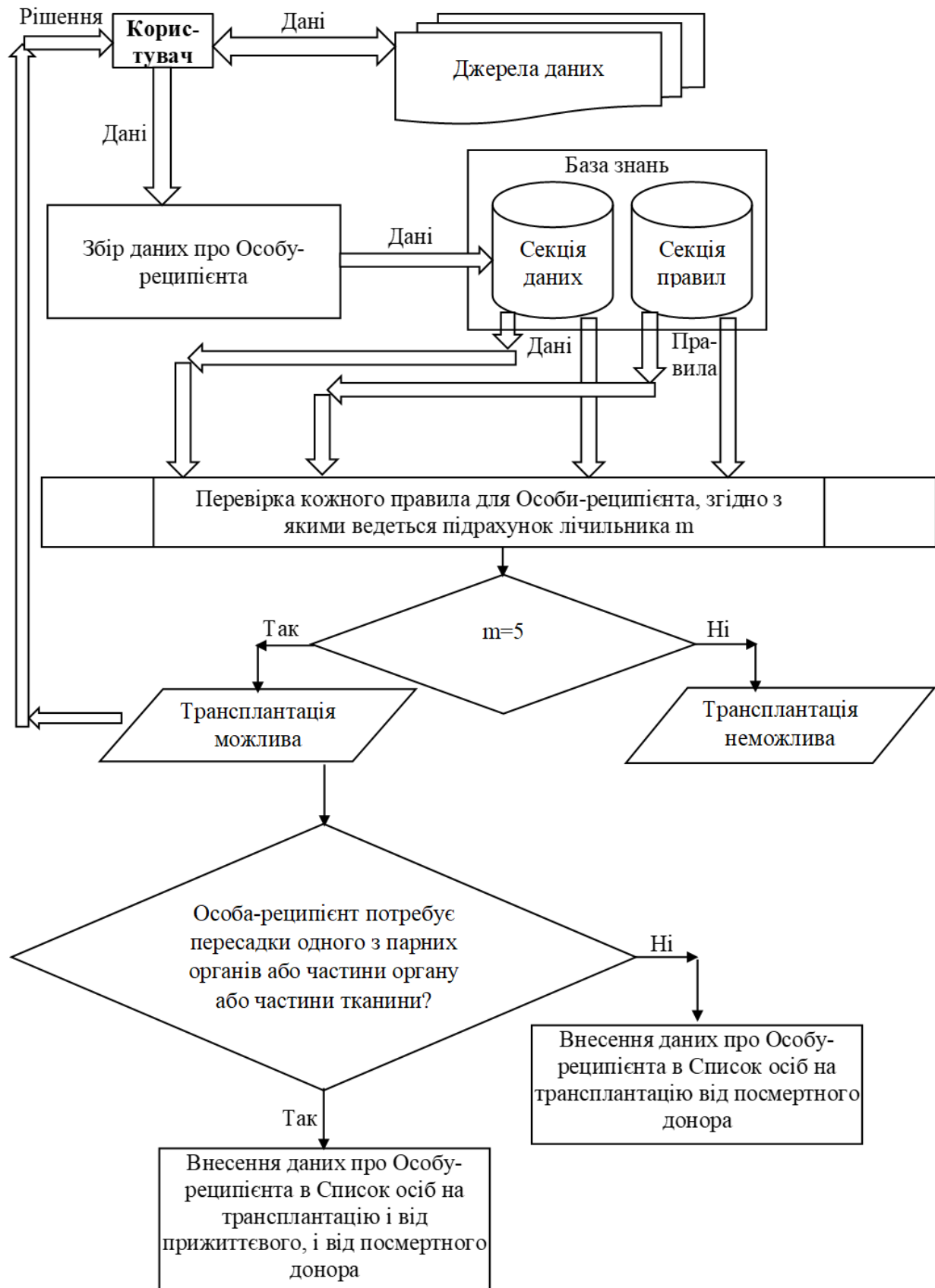


Рис. 3. Схема методу підтримки прийняття рішень щодо можливості трансплантації на основі цивільного права

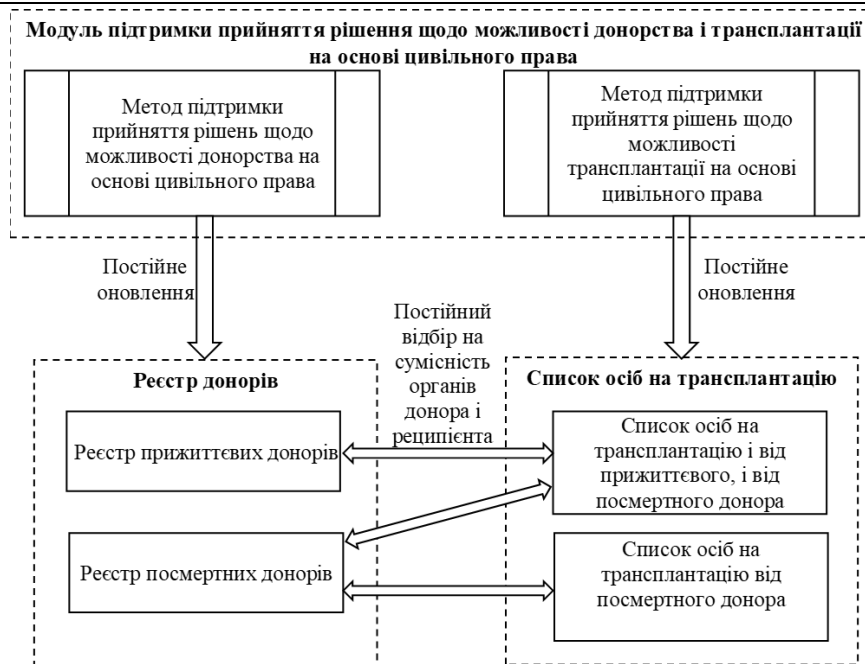


Рис. 4. Використання майбутнього модуля підтримки прийняття рішення щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права у ЄДІСТ

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблені методи підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права унеможливають прийняття некоректних (неправомірних) рішень щодо можливості/неможливості донорства та/або трансплантації. Використання розроблених методів підвищує рівень коректності прийнятих рішень щодо донорства та щодо трансплантації. Ці методи забезпечують можливість персоналу клінік, які займаються трансплантаціями, коректно формувати Реєстри донорів (прижиттєвих та помертвих) та Списки осіб на трансплантацію (від прижиттєвих та помертвих донорів або від виключно помертвих донорів) з врахуванням всіх діючих наразі цивільно-правових підстав. Розроблені методи стандартизують процедуру включення донорів до Реєстру та реципієнтів до Списку на трансплантацію, зводячи до мінімуму вплив суб'єктивізму та людського фактору при цьому.

Отже, модуль підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права системи ЄДІСТ, побудований на основі запропонованих методів, уможливить: швидку та автоматичну перевірку всіх цивільно-правових підстав для внесення особи в Реєстр донорів або Список осіб на трансплантацію відповідно; ухвалення безпомилкових (з точки зору цивільно-правових підстав) рішень про донорство і трансплантацію; мінімізацію впливу суб'єктивізму та людського фактору при ухваленні рішень щодо можливості/неможливості донорства та трансплантації. Відтак, важливою та нагальною задачею наразі є реалізація спроектованого модуля підтримки прийняття рішень щодо можливості донорства і трансплантації на основі цивільного права.

Література

1. Про застосування трансплантації анатомічних матеріалів людині : закон України № 2427-VIII від 07.05.2018 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2427-19>.
2. Yurchenko N. Organ transplants are thousands of saved lives. URL: <http://www.golos.com.ua/article/278750>.
3. Hovorushchenko T. Supporting the decision-making about the possibility of donation and transplantation based on civil law grounds / T. Hovorushchenko, A. Herts, Ye. Hnatchuk, O. Sachenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1246. – P. 357–376.

References

1. Pro zastosuvannya transplantatsii anatomichnykh materialiv liudyni : zakon Ukrainy № 2427-VIII vid 07.05.2018 r. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2427-19>.
2. Yurchenko N. Organ transplants are thousands of saved lives. URL: <http://www.golos.com.ua/article/278750>.
3. Hovorushchenko T. Supporting the decision-making about the possibility of donation and transplantation based on civil law grounds / T. Hovorushchenko, A. Herts, Ye. Hnatchuk, O. Sachenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1246. – P. 357–376.

МОСКАЛЕНКО А. О.

Міжнародний науково-технічний університет ім. академіка Ю. Бугая

<https://orcid.org/0000-0001-7433-3105>e-mail: a.moskalenko@istu.edu.ua

ОСЯДЛИЙ В. В.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7861-4684>vitalik9865@gmail.com

МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДОСТАТНОСТІ МЕДИЧНИХ ДАНИХ

Метою даного дослідження є підвищення ефективності керування медичними даними шляхом розроблення методу оцінювання достатності медичних даних перед розміщенням їх у блокчейн. Розроблено моделі блоку блокчейну, фрагменту блокчейну та вузла блокчейну, представлені у формалізованому вигляді, а також моделі процесу керування медичними даними (оцінювання достатності даних), які є теоретичним підґрунтям для розроблення методу оцінювання достатності медичних даних. Розроблено правила для визначення достатності медичних даних, які забезпечують аналіз медичних даних на предмет відшукання всіх наперед визначених необхідних елементів медичних даних; прийняття рішення про достатність або недостатність інформації; виведення візуалізованих підказок, яких елементів даних не вистачає, для забезпечення можливості швидкого доповнення даних; кількісну оцінку достатності медичних даних. Розроблено метод оцінювання достатності медичних даних, який забезпечує: можливість аналізу множини медичних даних на предмет їх достатності; можливість кількісного оцінювання достатності медичних даних; в разі недостатності медичних даних у множині, формування рекомендацій щодо доповнення множини медичних даних – як керівництво, яку інформацію слід додати у множини медичних даних для можливості їх завантаження в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну.

Ключові слова: блокчейн-технологія, блок блокчейну, розділ блоку блокчейну, медичні дані, достатність медичних даних.

Artem MOSKALENKO

Academician Yuriy Bugay International Scientific and Technical University

Vitaliy OSYADLYI

Khmelnytskyi National University

MODEL AND METHOD OF ASSESSING THE MEDICAL DATA SUFFICIENCY

The conducted state-of-the-art on known decisions on the use of blockchain technologies in the construction of information technology for medical data management showed that, despite a large number of different solutions, effective methods and solutions for medical data management based on blockchain technologies are currently lacking. Thus, improving the efficiency of medical data management by developing methods of medical data management based on blockchain technologies is currently an urgent problem. The aim of this study is to improve the efficiency of medical data management by developing a method for assessing the sufficiency of medical data before placing them in the blockchain.

Models of blockchain block, blockchain fragment and blockchain node, presented in formalized form, as well as models of medical data management process (data sufficiency assessment) are developed, which are the theoretical basis for developing a method of assessing the medical data sufficiency.

Rules for determining the sufficiency of medical data have been developed, which provide analysis of medical data in order to find all the predetermined necessary elements of medical data; to decide on the sufficiency or insufficiency of information; output of visualized hints, which data elements are missing, to ensure the ability to quickly add data; quantitative assessment of the sufficiency of medical data.

The paper developed a method for assessing the sufficiency of medical data, which provides: the ability to analyze a variety of medical data for their sufficiency; the ability to quantify the sufficiency of medical data; in case of insufficiency of medical data in the set, formation of recommendations on supplementing the set of medical data – as a guide, what information should be added to the set of medical data to be able to download them to the section "Block data" of blockchain.

Keywords: blockchain technology, blockchain block, blockchain block section, medical data, medical data sufficiency.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні медичні інформаційні технології повинні відповідати 4 вимогам: ефективність, безпека, новизна та економічна вигода [1].

Інформаційні системи є ключовим фактором успіху медичних досліджень та охорони здоров'я. В даний час більшість цих систем використовують гетерогенні та власні моделі даних, які перешкоджають обміну даними та комплексному аналізу даних у наукових цілях. Через складність медичної термінології загальна кількість моделей медичних даних дуже велика. Наразі переважна більшість цих моделей недоступні науковому співтовариству [2].

Сфера охорони здоров'я в Україні давно потребує змін, і безліч можливостей блокчейн-технології (blockchain) можуть допомогти їй очолити трансформацію цієї сфери та забезпечити відповідність зазначеним 4-м вимогам. Доказом зростання затребуваності блокчейн-технології може служити результат дослідження, проведеного в жовтні 2017 року командою «Black Book» [3]. В ході цього дослідження було опитано 88 споживачів системи охорони здоров'я (серед них – представники страхових компаній, споживачі медичних послуг) та 276 постачальників медичних послуг (відповідальних за технологічний процес

фахівців, менеджерів і IT-фахівців). «Black Book» виявив, що 19% керівників медичними організаціями та 76% представників, які оплачують медичні послуги, розглядали або вже застосовували рішення на основі блокчейн-технології. Таким чином, підвищена увага до технології розподілених реєстрів привела до розуміння потенціалу застосування блокчейн-технології в системі охорони здоров'я. Блокчейн вже довів свою ефективність у галузі охорони здоров'я та природничих наук, допомагаючи зміцнити довіру та оптимізувати співпрацю.

Блокчейн – це один із способів розподіленого зберігання даних. Цю технологію можна використовувати для запису та відстеження будь-якого виду інформації: від медичних показників до проведення виборів [4]. Блокчейн (від англійської blockchain) дослівно перекладається як ланцюг із блоків. У кожному з таких блоків у цифровому вигляді записана та чи інша інформація. Будь-який користувач може переглянути цю інформацію, але не може її змінити [5].

Кожен блок пов'язаний з попереднім та наступним блоком. Блоки утворюють ланцюжок даних по мірі того, як ресурс переміщається з одного місця до іншого або змінює власників. Блоки підтверджують точний час та порядок виконання транзакцій. Крім того, блоки нерозривно зчеплені один з одним, що виключає можливість зміни блоку або вставки між двома іншими блоками [6].

Блокчейн перетворить медичні підприємства та підвищить якість обслуговування, дозволяючи розвиватися новим екосистемам та новим бізнес-моделям. Інформація про охорону здоров'я, що зберігається в блокчейні, може змінити спосіб зберігання клінічної інформації, а також те, як відбувається обмін інформацією в організації, з партнерами з охорони здоров'я, платниками і, головне, з пацієнтами. Блокчейн децентралізує медичну інформацію, підвищуючи доступність, ефективність, прозорість даних та довіру до них, але також вимагає ретельного планування, щоб максимально використати переваги, які він приносить [7].

За допомогою блокчейну користувачі можуть зберігати важливі медичні дані, оригінальність яких можна перевірити, якщо є підозра на підробку. Крім того, можуть бути використані криптографічні алгоритми для забезпечення конфіденційності медичних даних (наприклад, зловмисник не зможе прочитати текст, якщо він вкрав дані) [8].

Як правило, більшість даних в електронних медичних картках залишаються незмінними після їх завантаження в систему. Таким чином, блокчейн потенційно може використовуватися для полегшення обміну медичними даними. Різні медичні організації та окремі особи (наприклад, лікарі, лікарні, медичні лабораторії та страхові компанії) можуть отримати доступ до електронних медичних карток, що зберігаються в блокчейні, з більш високим рівнем довіри. Блокчейн-рішення пропонують ефективні підходи до надійного управління медичними даними, коли зберігаються та обробляються конфіденційні дані пацієнтів. Звісно, для успішного впровадження технології блокчейн в управління медичними даними важливо отримати згоду лікарів і пацієнтів. Наразі багато інституційних та промислових закладів вже визнали важливість технології для сектора охорони здоров'я, а також сформулювали основні ідеї, концепції та основні варіанти використання [9].

Відтак, наразі актуальною задачею для України є потреба у керуванні медичними даними на основі блокчейн-технологій.

Моделювання процесу керування медичними даними: оцінювання достатності

В процесі керування медичними даними з використанням блокчейн-технологій медичні дані будуть розташовуватись в блоках блокчейну. Тому для початку розглянемо структуру блоку блокчейну. Враховуючи, що заголовок блоку блокчейну містить дату та час, версію, метадані, цифрові підписи сторін, власний зашифрований код, хеш попереднього блоку, представимо такий блок у наступному формалізованому вигляді – у вигляді кортежу його елементів:

$$B = \langle H, D \rangle = \langle (d, t, v, md, ec, ds, hb), D \rangle \quad (1)$$

де H – заголовок блоку, D – дані блоку, d – дата, t – час, v – версія, md – метадані, ec – власний зашифрований код, ds – цифрові підписи сторін, hb – хеш попереднього блоку.

Блокчейн – це ланцюг із блоків. Кожен блок пов'язаний з попереднім та наступним блоком. Блоки нерозривно зчеплені один з одним, що виключає можливість зміни блоку або вставки між двома блоками. Тому представимо фрагмент блокчейну у формалізованому вигляді – у вигляді множини кортежів, які представляють блоки блокчейну:

$$\begin{aligned}
BCH &= \{B_1, B_2, \dots, B_{n-1}, B_n, B_{n+1}, \dots\} = \\
&= \{ \langle (d_1, t_1, v_1, md_1, ec_1, ds_1), D_1 \rangle < (d_2, t_2, v_2, md_2, ec_2, ds_2, hb_1), D_2 \rangle < \dots, \\
&< (d_{n-1}, t_{n-1}, v_{n-1}, md_{n-1}, ec_{n-1}, ds_{n-1}, hb_{n-2}), D_{n-1} \rangle, \\
&< (d_n, t_n, v_n, md_n, ec_n, ds_n, hb_{n-1}), D_n \rangle < (d_{n+1}, t_{n+1}, v_{n+1}, md_{n+1}, ec_{n+1}, ds_{n+1}, hb_n), D_{n+1} \rangle, \\
&\dots \}
\end{aligned} \tag{2}$$

де номер елементу hb вказує, що це хеш саме попереднього блоку.

Блоки блокчейну зберігаються у вузлах, які допомагають синхронізувати та своєчасно оновлювати дані для всіх учасників. Крім блоків, у вузлах зберігаються комплекси математичних завдань для зміни блоку – так звані Proof-of-Work tasks, призначені для ускладнення процесу доказу і забезпечення безпеки блокчейну.

В мережі блокчейну зберігається також смарт-контракт – набір правил для прискорення транзакцій, які виконуються в автоматичному режимі.

Враховуючи вищевикладене, представимо вузол блокчейну у наступному формалізованому вигляді:

$$\begin{aligned}
BCH &= \{ \langle (d_1, t_1, v_1, md_1, ec_1, ds_1), D_1 \rangle < (d_2, t_2, v_2, md_2, ec_2, ds_2, hb_1), D_2 \rangle < \dots, \\
&< (d_{n-1}, t_{n-1}, v_{n-1}, md_{n-1}, ec_{n-1}, ds_{n-1}, hb_{n-2}), D_{n-1} \rangle < (d_n, t_n, v_n, md_n, ec_n, ds_n, hb_{n-1}), D_n \rangle < (d_{n+1}, t_{n+1}, v_{n+1}, md_{n+1}, ec_{n+1}, ds_{n+1}, hb_n), D_{n+1} \rangle, \dots \}, T >
\end{aligned} \tag{3}$$

де T – множина Proof-of-Work tasks.

В процесі керування медичними даними слід поєднати наявні в медичних установах медичні дані, якими слід обмінюватись з іншими медичними (і не тільки) установами, із мережею блокчейну з метою організації захисту медичних даних/

Зазвичай, медичними даними вважають тільки ті дані, що отримують при вимірюванні характеристик пацієнта. Кількість характеристик пацієнта чимала (і не залежить, чи йде мова про хвору або здорову людину).

Для більшості медичних даних характерні наступні особливості: нечіткість; неузгодженість термінології; велика кількість якісних ознак, які суб'єктивно оцінюють стан хворого; відсутність єдиних алгоритмів опису стану пацієнта; відсутність єдиних алгоритмів опису діагностичного і лікувального процесів; недостатній рівень стандартизації медичної документації; значна різноманітність медичних даних.

Тому слід оцінити достатність медичних даних, перш ніж заносити їх в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну. Достатність – змістовна повнота набору показників для прийняття рішення. Достатність (повнота) інформації означає, що містить мінімальний, але достатній для прийняття правильного рішення склад (набір показників). Поняття повноти інформації пов'язане з її змістом (семантикою) та прагматикою. Як неповна, тобто недостатня для прийняття правильного рішення, так і надмірна інформація знижує ефективність прийнятих користувачем рішень. Повнота інформації багато в чому характеризує якість інформації та визначає достатність даних для прийняття рішень або для створення нових даних з урахуванням наявних. Чим повніші дані, тим ширший діапазон методів, які можна використовувати, тим простіше підібрати метод, що вносить мінімум похибок у хід інформаційного процесу. Відтак головною умовою для цього є розуміння того, що саме (які саме обов'язкові елементи) має бути представлено у медичних даних, які слід занести в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну.

Процес оцінювання достатності медичних даних полягає у:

1) аналізі медичних даних на предмет відшукування всіх наперед визначених необхідних елементів медичних даних;

2) прийнятті рішення про достатність або недостатність інформації – якщо всі наперед визначені необхідні елементи медичних даних наявні, то приймається рішення про достатність інформації і можливість занесення їх в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну; якщо не всі наперед визначені необхідні елементи медичних даних наявні, то приймається рішення про недостатність інформації і доповнення даних перед занесенням їх в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну;

3) для можливості швидкого доповнення даних виводяться підказки стосовно того, які саме необхідні елементи медичних даних відсутні, як керівництво, які елементи даних слід додати для можливості їх завантаження в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну.

Додатково може бути обчислена кількісна оцінка достатності медичних даних за формулою:

$$smd = \frac{amd}{md}, \quad (4)$$

де amd – кількість доступних елементів медичних даних, md – необхідна кількість елементів медичних даних.

Метод оцінювання достатності медичних даних

Дані блоку D є множиною записів: $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$. Індивідуальний запис в множині медичних даних сприймається як система із трьох елементів (тріада) – тип, час і якість, що представлено в наступному формалізованому вигляді у вигляді трійок:

$$d_i = \langle dtp_i, dtm_i, dq_i \rangle, \quad (5)$$

де dtp_i – тип даних (тип даних може бути динамічним – наприклад, аналіз крові, або статичним – геном, відбитки пальців); dtm_i – час даних, дата, коли ці дані було отримано; dq_i – якість даних, де враховується «термін придатності» інформації чи аналізів – чим вона вища, тим цінніша інформація; наприклад, результат перевірки на холестерин діє півроку, а генетичний тест – все життя; $i = 1..k$, k – кількість записів в множині медичних даних, які готуються до занесення у блок блокчейну.

Враховуючи, що дані блоку D є множиною записів: $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$, а індивідуальний запис в множині медичних даних сприймається як система із трьох елементів, що представлено формулою (5), тоді еталонні медичні дані представимо у вигляді множини:

$$D_{st} = \{ \langle dtp_1, dtm_1, dq_1 \rangle, \dots, \langle dtp_i, dtm_i, dq_i \rangle, \dots, \langle dtp_k, dtm_k, dq_k \rangle \}, \quad (6)$$

Наявна ж множина медичних даних, які плануються до занесення у блок блокчейну, може бути представлена у вигляді матриці:

$$D_{av} = \begin{pmatrix} dtp_{1av} & dtm_{1av} & dq_{1av} \\ dtp_{2av} & dtm_{2av} & dq_{2av} \\ \dots & \dots & \dots \\ dtp_{iav} & dtm_{iav} & dq_{iav} \\ \dots & \dots & \dots \\ dtp_{kav} & dtm_{kav} & dq_{kav} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

де елементи dtp_{iav} , dtm_{iav} , dq_{iav} ($i = 1..k$; k – кількість записів в множині медичних даних, які готуються до занесення у блок блокчейну) можуть бути відсутні, якщо медичні дані у множині є недостатніми.

Враховуючи, що всі наведені у формулі (6) елементи медичних даних є обов'язковими з точки зору достатності медичних даних, то *правила для визначення достатності медичних даних* мають вигляд:

1) якщо в i -му записі даних множини D_{av} ($i = 1..k$) наявна інформація про тип даних (наявний елемент dtp_{iav}), то: $sdp = sdp + 1$ та $b[i, 1] = 1$, інакше $b[i, 1] = 0$;

2) якщо в i -му записі даних множини D_{av} ($i = 1..k$) наявна інформація про час даних (наявний елемент dtm_{iav}), то: $sdtm = sdtm + 1$ та $b[i, 2] = 1$, інакше $b[i, 2] = 0$;

3) якщо в i -му записі даних множини D_{av} ($i = 1..k$) наявна інформація про якість даних (наявний елемент dq_{iav}), то: $sdq = sdq + 1$ та $b[i, 3] = 1$, інакше $b[i, 3] = 0$.

Враховуючи особливості формування матриці B , *правила для формування рекомендацій щодо доповнення множини медичних даних* мають вигляд:

1) якщо $b[i, 1] = 0$, то користувачу надається рекомендація щодо доповнення i -го запису даних блоку ($i = 1..k$) інформацією про тип даних;

2) якщо $b[i, 2] = 0$, то користувачу надається рекомендація щодо доповнення i -го запису даних блоку ($i = 1..k$) інформацією про час даних;

3) якщо $b[i,3]=0$, то користувачу надається рекомендація щодо доповнення i -го запису даних блоку ($i=1..k$) інформацією про якість даних.

Тоді *метод оцінювання достатності медичних даних* складається з наступних кроків:

1) аналіз множини медичних даних D_{av} перед занесенням їх у розділ «Дані блоку» блоку блокчейну з використанням кожного з розроблених правил для визначення достатності медичних даних та підрахунок лічильників sdp , $sdtm$, sdq ;

2) обчислення кількісної оцінки достатності медичних даних за формулою:

$$sfmd = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{sdp}{k} + \frac{sdtm}{k} + \frac{sdq}{k} \right) \quad (8)$$

3) якщо $sdp=k$ та $sdtm=k$ та $sdq=k$ та $sfmd=1$, то приймається рішення про достатність медичних даних в множині D_{av} (оскільки всі елементи множини медичних даних є обов'язковими з точки зору достатності медичних даних і наявні у множині D_{av} медичних даних, які готуються до занесення у блок блокчейну) і занесення даних множини D_{av} в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну;

4) якщо $sdp < k$ або $sdtm < k$ або $sdq < k$ або $sfmd < 1$, то: приймається рішення про недостатність медичних даних у множині D_{av} ; така множина медичних даних потребує доопрацювання перед занесенням цих даних в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну; користувачу надаються рекомендації щодо доповнення множини медичних даних – згідно із правилами для формування рекомендацій щодо доповнення множини медичних даних D_{av} – як керівництво, яку інформацію слід додати у множину медичних даних D_{av} для можливості їх завантаження в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну; відбувається доповнення множини медичних даних D_{av} ; відбувається повернення на крок 1 Методу.

Розроблений метод оцінювання достатності медичних даних забезпечує: можливість аналізу множини медичних даних на предмет їх достатності; можливість кількісного оцінювання достатності медичних даних; в разі недостатності медичних даних у множині, формування рекомендацій щодо доповнення множини медичних даних D_{av} – як керівництво, яку інформацію слід додати у множину медичних даних D_{av} для можливості їх завантаження в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На сьогодні процеси прийняття рішень у сфері охорони здоров'я є трудомісткими та складними. Продуктивність праці медичних працівників може бути збільшена завдяки використанню інформаційних технологій. Саме інформаційні технології можуть зменшити кількість медичних помилок, надати більш надійні рішення та зменшити витрати на охорону здоров'я. Сьогодні медичні інформаційні технології повинні відповідати 4 вимогам: ефективність, безпека, новизна та економічна вигода. Сфера охорони здоров'я в Україні давно потребує змін, і безліч можливостей блокчейн-технології можуть допомогти їй очолити трансформацію цієї сфери та забезпечити відповідність зазначеним 4-м вимогам. Таким чином, підвищена увага до технології розподілених реєстрів привела до розуміння потенціалу застосування блокчейн-технології в системі охорони здоров'я. Отже, наразі актуальною задачею є потреба у керуванні медичними даними на основі блокчейн-технологій. Метою даного дослідження є підвищення ефективності керування медичними даними шляхом розроблення методу оцінювання достатності медичних даних перед розміщенням їх у блокчейн.

Розроблено моделі блоку блокчейну, фрагменту блокчейну та вузла блокчейну, представлені у формалізованому вигляді, а також моделі процесу керування медичними даними (оцінювання достатності даних), які є теоретичним підґрунтям для розроблення методу оцінювання достатності медичних даних.

Розроблено правила для визначення достатності медичних даних, які забезпечують аналіз медичних даних на предмет відшукування всіх наперед визначених необхідних елементів медичних даних; прийняття рішення про достатність або недостатність інформації; виведення візуалізованих підказок, яких елементів даних не вистачає, для забезпечення можливості швидкого доповнення даних; кількісну оцінку достатності медичних даних.

Розроблено метод оцінювання достатності медичних даних, який забезпечує: можливість аналізу множини медичних даних на предмет їх достатності; можливість кількісного оцінювання достатності медичних даних; в разі недостатності медичних даних у множині, формування рекомендацій щодо доповнення множини медичних даних – як керівництво, яку інформацію слід додати у множину медичних даних для можливості їх завантаження в розділ «Дані блоку» блоку блокчейну.

Література

1. Денисюк В. І. Доказова внутрішня медицина / В.І.Денисюк, О.В.Денисюк – Вінниця : Інше Видавництво, 2011. – 928 с.
2. Dugas M. Portal of medical data models: information infrastructure for medical research and healthcare / M. Dugas, P. Neuhaus, A. Meidt, J. Doods, M. Storck, P. Bruland, J. Varghese // Database: The Journal of

Biological Databases and Curation. – 2016. – Paper bav121.

3. Healthcare Industry interest in Blockchain is heating up, Black Book Survey, Q3. URL: <https://www.newswire.com/files/16/40/321b6089f1b01dfd80433bffb0df.pdf>.

4. Zeng Y. Review of research on blockchain application development method / Y. Zeng, Y. Zhang // Journal of Physics Conference Series. – 2019. – Vol. 1187. – Article Number 052005.

5. Xu Z. What can blockchain do and Cannot do? / Z. Xu, C. Zou // China Economic Journal. – 2021. – Vol. 14. – Issue 1. – Pp. 4-25.

6. Li W. An Overview of Blockchain Technology: Applications, Challenges and Future Trends / W. Li, M. He, H. Sang // 2021 IEEE 11th International Conference On Electronics Information and Emergency Communication: Proceedings. – Beijing, 2021. – P. 31–39.

7. Transform healthcare outcomes with the simplicity of IBM Blockchain. URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/DQPLDP8N>.

8. Kim T. DynamiChain: Development of Medical Blockchain Ecosystem Based on Dynamic Consent System / T. Kim, S. Lee, D. Chang, J. Koo, T. Kim, K. Yoon, I. Choi // Applied Sciences-Basel. – 2021. – Vol. 11. – Issue 4. – Article number 1612.

9. Zou R. SPChain: Blockchain-based medical data sharing and privacy-preserving eHealth system / R. Zou, X. Lv, J. Zhao // Information Processing & Management. – 2021. – Vol. 58. – Issue 4. – Article number 102604.

References

1. V. Denysyuk, O. Denysyuk. Evidence-Based Internal Medicine. Vinnytsya: Inshe vydavnytstvo, 2011. 928 p.
2. M. Dugas, P. Neuhaus, A. Meidt, J. Doods, M. Storck, P. Bruland, J. Varghese. Portal of medical data models: information infrastructure for medical research and healthcare. Database: The Journal of Biological Databases and Curation. 2016. Paper bav121.
3. Healthcare Industry interest in Blockchain is heating up, Black Book Survey, Q3. URL: <https://www.newswire.com/files/16/40/321b6089f1b01dfd80433bffb0df.pdf>.
4. Y. Zeng, Y. Zhang. Review of research on blockchain application development method. Journal of Physics Conference Series. 2019. Vol. 1187. Article Number 052005.
5. Z. Xu, C. Zou. What can blockchain do and Cannot do? China Economic Journal. 2021. Vol. 14. Issue 1. P. 4-25.
6. W. Li, M. He, H. Sang. An Overview of Blockchain Technology: Applications, Challenges and Future Trends. 2021 IEEE 11th International Conference On Electronics Information and Emergency Communication: Proceedings. Beijing, 2021. P. 31-39.
7. Transform healthcare outcomes with the simplicity of IBM Blockchain. URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/DQPLDP8N>.
8. T. Kim, S. Lee, D. Chang, J. Koo, T. Kim, K. Yoon, I. Choi. DynamiChain: Development of Medical Blockchain Ecosystem Based on Dynamic Consent System. Applied Sciences-Basel. 2021. Vol. 11. Issue 4. Article number 1612.
9. R. Zou, X. Lv, J. Zhao. SPChain: Blockchain-based medical data sharing and privacy-preserving eHealth system. Information Processing & Management. 2021. Vol. 58. Issue 4. Article number 102604.

ОСОЛІНСЬКИЙ О. Р.

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0136-395X>e-mail: osolinskiy.oleksandr@gmail.com**КОЧАН В. В.**

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8376-4660>e-mail: volodymyr.kochan@gmail.com**САЧЕНКО А. О.**

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0907-3682>e-mail: as@wunu.edu.ua**КОЧАН О. В.**

Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-3164-3821>e-mail: orestvk@gmail.com**КОЧАН Р. В.**

Університет Бельсько-Бяла, Польща

<https://orcid.org/0000-0003-1254-1982>e-mail: orestvk@gmail.com

ФОРМУВАЧ ІМПУЛЬСІВ ДОВІЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ

У даній роботі розглянуто можливість побудови універсального формувача імпульсів на базі елементів ТТЛ (транзисторно-транзисторної логіки), який забезпечує формування імпульсів заданої тривалості у момент поступлення на вхід від'ємного фронту вхідного імпульсу запуску (перепадку від логічної одиниці у логічний нуль).

Ключові слова: формувач імпульсів, імпульси довільної тривалості, транзисторна логіка

Oleksandr OSOLINSKY, Volodymyr KOCHAN, Anatoliy SACHENKO

Western Ukrainian National University

Orest KOCHAN

Institute of Computer Technology, Automation and Metrology Lviv Polytechnic National University

Roman KOCHAN

University of Bielsko-Biala: Bielsko-Biala, PL

ARBITRARY DURATION PULSE SHAPER

This paper considers the possibility of constructing a universal pulse generator based on TTL (transistor-transistor logic) elements, which provides pulses of a given duration at the time of entry to the input of the negative edge of the input start pulse (difference from logical unit to logical zero). The duration of the generated output pulse can be set by the capacitance of one capacitor and does not depend on the duration of the input pulse. A significant advantage of the proposed pulse shaper is the high steepness of both the positive front (difference from logical zero to logical unit) and the negative edge of the generated output pulse (difference from logical unit to logical zero), which depends only on the operation time of logical elements and not depends on the duration of both input (start) and output pulses. This advantage is based on the action of positive feedback at the time of formation of both positive and negative fronts of the output pulse. In this case, the feedback circuits in the formation of positive and negative fronts of the output pulse are different, which does not allow the circuit to switch to self-excitation mode (autogeneration). The advantages of the proposed pulse shaper (high steepness of the fronts with little complication of the circuit compared to the known capacitor pulse shapers) are determined by using the internal structure of the logic elements of the TTL series. This paper also considers the possibility of reducing the capacitance of the capacitor by several tens of times, which determines the duration of long output pulses, due to the introduction of an emitter repeater. The main disadvantage of the proposed pulse shaper is the low temperature and time stability of the duration of the formed output pulse, which is characteristic of all capacitor pulse shapers.

Keywords: pulse shaper, pulses of a given duration, pulse duration, TTL.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У багатьох схемах виникає необхідність перетворення тривалості імпульсів, зокрема, формування імпульсів (ФІ) заданої тривалості [1]. Серед цих пристроїв чітко виділяють два класи – ті, які мають забезпечити високу точність і стабільність тривалості формованих імпульсів (0,1% та краще), та ті, до яких така вимога не ставиться. Перші базуються на високо-стабільних генераторах (кварцових або LC [2]) і лічильниках імпульсів, мають складну схему і використовуються доволі рідко. Другі простіші (зазвичай, базуються на RC-ланках) і використовуються значно частіше [3–6]. Особливий клас серед них займають так звані ФІ на логічних елементах (ЛЕ), що часто використовуються у мікроелектроніці. Дана робота присвячена розробці такого ФІ на ЛЕ, який краще за інші поєднує основні параметри ФІ.

Аналіз схемотехніки формувачів імпульсів на логічних елементах

До ФІ, зазвичай, ставляться вимоги простоти схеми (використання якомога меншої кількості ЛЕ та інших деталей), універсальності (можливості формування імпульсів у широкому діапазоні тривалості) та крутизни фронтів. Існує безліч схем ФІ [1, 3–7], кожна з яких має свої особливості та недоліки.

Вузька спеціалізація більшості ФІ [3–7] проявляється у тому, що вони формують або короткі імпульси (тривалість яких менша тривалості вхідного імпульсу) або довгі імпульси (тривалість яких більша тривалості вхідного імпульсу). Для усунення цього недоліку на вході деяких ФІ ставлять диференціюючу RC ланку, яка скорочує вхідний імпульс [7]. Тоді підключений до її виходу ФІ має змогу формувати лише довгі імпульси (порівняно із вихідними імпульсами диференціюючої RC ланки).

Спільним для переважної більшості схем ФІ є значне зниження крутизни фронтів імпульсів (перепаду з логічного нуля у логічну одиницю, або з логічної одиниці у логічний нуль), особливо при збільшенні тривалості формованих імпульсів. Аналіз показує, що це пов'язано із тим, що у ФІ, які базуються на RC-ланках, ЛЕ працюють не у штатному режимі, а у режимі аналогового підсилювача. Але найчастіше використовувані ЛЕ, що відносяться до ТТЛ [8] або КМОН логіки, у такому режимі мають відносно малі коефіцієнт підсилення та максимальний вихідний струм, що затягує перезаряд конденсатора великої ємності. Часом, для підвищення крутизни фронтів, використовують елементи з гістерезисом або тригери [5], але такі ФІ рідко використовують у електронних схемах, виконаних на ЛЕ.

Серед інших високою крутизною фронтів відзначається схема ФІ, описана у [7], де для підвищення крутизни фронтів імпульсів на виході ФІ використано додатний зворотний зв'язок. У цьому ФІ ЛЕ по суті формують RS тригер (див. [7], рис. 6.30а), тому крутизна фронтів формованих імпульсів висока. Недоліком цього ФІ є те, що він, при дії завад невеликої амплітуди, має схильність переходити у режим самозбудження. Адже другий ЛЕ І-НІ у ньому, під дією підключеного до входу резистора, переходить у режим підсилювача. А два ЛЕ, що входять у цей ФІ, створюють підсилювальну систему із 100%-ним додатним зворотним зв'язком. Тільки при великих рівнях сигналу ЛЕ працюють штатно. При малих рівнях сигналу (наприклад, під дією завад) ФІ переходить у режим генерації коливальних малих амплітуд і перестає формувати потрібні імпульси.

Метою даної статті є розроблення на базі ЛЕ ТТЛ [8] логіки ФІ довільної тривалості, який у всіх випадках має мінімальну для даної серії ЛЕ тривалість фронтів формованих імпульсів.

Схема пропонованого формувача імпульсів довільної тривалості

Для забезпечення мінімальної тривалості фронтів формованих імпульсів необхідно, аналогічно до описаного у [7], використати додатний зворотний зв'язок. Однак для усунення можливості переходу у режим генерації треба розділити кола додатного зворотного зв'язку, які формують різні фронти (перепади від логічного нуля у логічну одиницю та від логічної одиниці у логічний нуль).

Схема, яка реалізує пропонований принцип роботи, подана на рис. 1. Вона містить чотири двохвходові ЛЕ І-НІ, вхідний ФІ (C1, R1), що скорочує вхідний імпульс, та задаючу тривалість вихідного імпульсу ланку C2, R2. На рис. 2 подано діаграми, які пояснюють роботу схеми, поданої на рис. 1. Для узгодження рис. 1 і 2 на рис. 1 позначено точки А ... Е, а на рис. 2 цим точкам відповідають часові діаграми імпульсів.

Для того, щоби робота пропонованого ФІ не залежала від тривалості вхідних імпульсів застосовано ФІ коротких імпульсів R1C1 на вході ЛЕ D1 (див. рис. 1). Як показано на рис. 2, прямокутний вхідний імпульс цей ФІ (див. точку А) перетворює у короткий імпульс, який перекидає RS тригер на ЛЕ D1, D2. Тоді на виході D1, D2 (див. точки В і С) появляються логічні нуль та одиниця відповідно.

Через те, що перепад напруги з логічної одиниці у логічний нуль у точці В передався через конденсатор C2 у точку D, на виході ЛЕ D3 (точка Е) зберігається логічна одиниця. Конденсатор C2 починає заряджатися вхідним струмом ЛЕ D3. Після того, як напруга у точці D досягне напруги спрацювання ЛЕ D3, на його виході (точка Е) появиться логічний нуль. Цей логічний нуль поверне RS тригер на ЛЕ D1, D2 у початковий стан, на його виходах (точки В і С) появляються логічні одиниця і нуль відповідно. Логічний нуль на виході ЛЕ D1 поверне на виході ЛЕ D3 логічну одиницю. Схема повернулася у початковий стан. Вихідний інвертор D4 усуває вплив навантаження та завад на перехідний процес заряду конденсатора C2. Як видно з фіг. 2, перехідний процес у диференціюючій ланці R1C1 (див. точку А) на момент закінчення формованого імпульсу (див. точку В) ще не скінчився. Але видно, що це не впливає на роботу схеми.

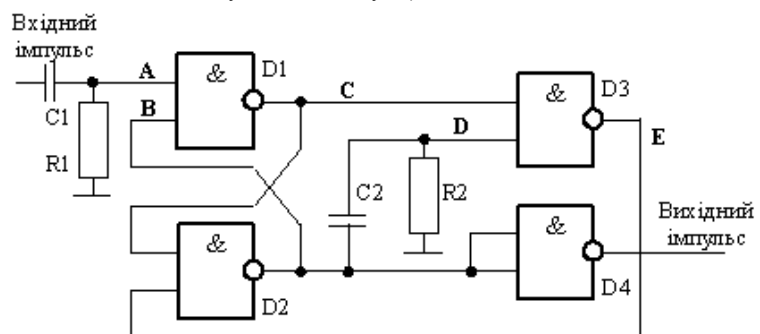


Рис. 1. Схема пропонованого формувача імпульсів довільної тривалості

Велика крутизна переднього фронту вихідного імпульсу (перепаду з логічного нуля у логічну одиницю) забезпечується дією додатного зворотного зв'язку при перекиданні тригера на ЛЕ D1, D2. Велика крутизна заднього фронту (перепаду з логічної одиниці у логічний нуль) вихідного імпульсу забезпечується дією додатного зворотного зв'язку при перекиданні ЛЕ D2, D3 через ланку C2, R2.

Недоліком ФІ, виконаного по схемі рис. 1 є необхідність використання конденсаторів великої ємності при необхідності формування імпульсів великої тривалості. Зменшити необхідну ємність у декілька десятків разів можна за допомогою емітерного повторювача, як це показано на рис. 3. На рис. 4 подано діаграми, які пояснюють роботу схеми, поданої на рис. 3.

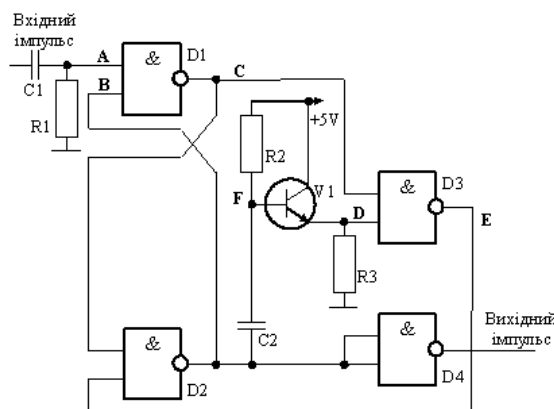


Рис. 3. Варіант схеми пропонованого формувача імпульсів адаптований для формування імпульсів великої тривалості

Різниця у тому, що заряд конденсатора C2 визначається резистором R2, струм через який визначається струмом бази транзистора V1. А струм бази у декілька десятків разів менший за вхідний струм елементів ТТЛ. Тому ємність конденсатора можна відповідно зменшити.

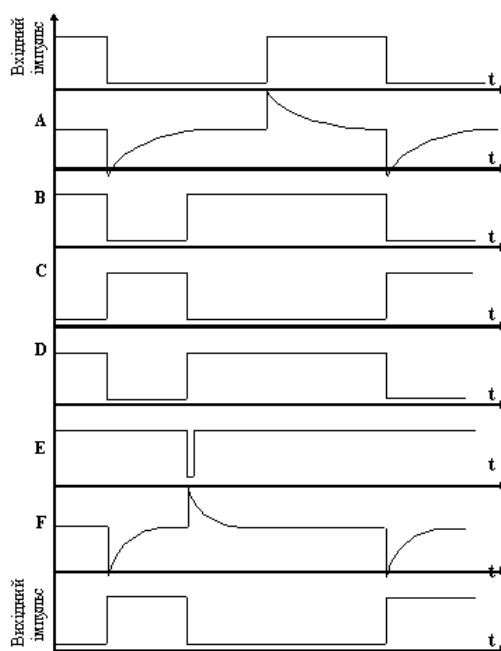


Рис. 4. Діаграми роботи формувача імпульсів великої тривалості

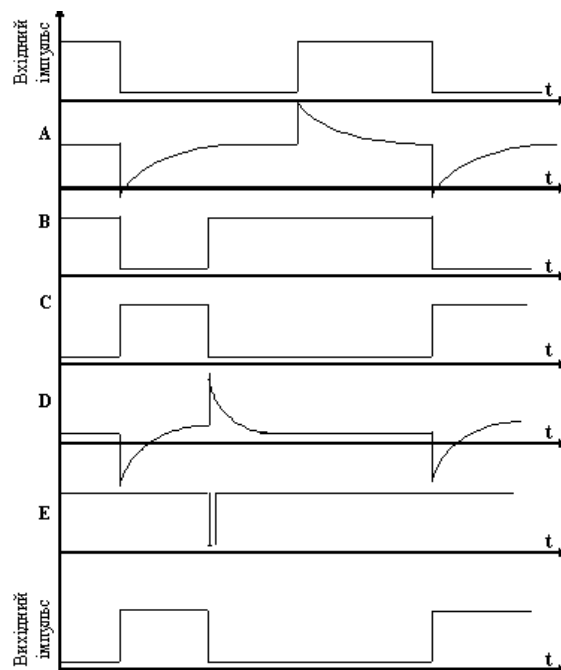


Рис. 2. Діаграми роботи пропонованого формувача імпульсів довільної тривалості

На рис. 3 позначено точки А ... F, а на рис. 4 цим точкам відповідають часові діаграми імпульсів. Для зменшення необхідної для формування довгих імпульсів ємності конденсатора у розрив ланки R2C2 (див. рис. 1) введено транзистор (див. рис. 3). Як видно з рис. 2 і рис. 4, робота схеми, поданої на рис. 3 практично ідентична роботі схеми, поданої на рис. 1.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Описаний ФІ використовує особливості схемотехніки елементів ТТЛ – якщо на одному вході ЛЕ ТТЛ (верхній вхід ЛЕ D3, точка С на рис. 1) є логічний нуль, то на інших входах цього ЛЕ (нижній вхід ЛЕ

D3, точка D на рис. 1) вхідний струм рівний нулю. Тому при появі логічної одиниці на верхньому вході ЛЕ D3, точка C (див. рис. 1) на нижньому вході ЛЕ D3, точка D, залишається логічний нуль (конденсатор C2 зберігає напругу незмінною). Тому у цьому ФІ при формуванні переднього і заднього фронтів імпульсу діє додатний зворотний зв'язок, а значить вихідні імпульси, які формує ФІ, мають круті fronti. Тривалість обох фронтів сумірна з часом спрацювання одного ЛЕ. При цьому тривалість фронтів не залежить від тривалості формованого імпульсу. Таким чином пропонований ФІ нескладний і використовує недорогі доступні елементи. При цьому він може формувати як дуже короткі, так і довгі імпульси. Переваги пропонованого ФІ, його універсальність (можливість формувати імпульси довільної тривалості) і велика крутизна фронтів, дають змогу успішно використовувати його у різноманітних схемах цифрової техніки на базі ЛЕ.

Література

1. Імпульсна техніка. Гол. редкол. : І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін. Енциклопедія Сучасної України. НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАНУ, 2006. URL: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=13282.
2. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы. Киев : Техніка, 1981.
3. Формирователи импульсов. URL: <https://kit-e.ru/circuit/formirovateli-impulsov/>
4. Формирователи импульсов по фронту сигнала. URL: http://www.gelezo.com/ttl_kmop/640000/640006/formirovateli_impulsov_po_frontu_signala.html
5. Одновибраторы на D-триггерах. URL: http://zpostbox.ru/odnovibratory_na_d-triggerakh.html
6. Формирователи импульсов. URL: <https://helpiks.org/4-15363.html>
7. Готра, З. Ю., Паскур, П. П., Матвиив, В. И. & Хромьяк И. Я. (1984). Справочник регулировщика радиоэлектронной аппаратуры. Львов : Издательство «Камея».
8. Транзисторно-транзисторная логика. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: <https://cutt.ly/2n1QxWG>.

References

1. Impulsna tekhnika. Hol. redkol. : I.M. Dziuba, A.I. Zhukovskiy, M.H. Zhelezniak ta in. Entsiklopediia Suchasnoi Ukrainy. NAN Ukrainy, NTSh. Kyiv : Instytut entsyklopedychnykh doslidzhen NANU, 2006. URL: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=13282.
2. Shveckij B.I. Jelektronnye cifrovye pribory. Kiev : Tehnika, 1981.
3. Formirovateli impul'sov. URL: <https://kit-e.ru/circuit/formirovateli-impulsov/>
4. Formirovateli impul'sov po frontu signala. URL: http://www.gelezo.com/ttl_kmop/640000/640006/formirovateli_impulsov_po_frontu_signala.html
5. Odnovibratory na D-triggerah. URL: http://zpostbox.ru/odnovibratory_na_d-triggerakh.html
6. Formirovateli impul'sov. URL: <https://helpiks.org/4-15363.html>
7. Gotra, Z. Ju., Paskur, P. P., Matviiv, V. I. & Hromjak I. Ja. (1984). Spravochnik regulirovshhika radiojelektronnoj apparatury. L'vov : Izdatel'stvo «Kamenjar».
8. Tranzistorno-tranzistornaja logika. Material iz Vikipedii – svobodnoj jenciklopedii. URL: <https://cutt.ly/2n1QxWG>.

АНТОНІЮК А. А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»
e-mail: anton3antonuk1999@gmail.com

КОЛЯДА К. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»

ПОВЕДІНКОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ БЛОКІВ ДАНИХ ПРИ ЇХ ВІДДАЛЕНОМУ РОЗПОДІЛЕНОМУ ЗБЕРІГАННІ

Розроблено поведінкову модель системи відновлення блоків даних при їх віддаленому розподіленому зберіганні. Модель була створена на основі методу відновлення даних при їх розподіленому зберіганні на віддалених сховищах. Використаний метод дозволяє забезпечити відновлення інформації при її втраті чи пошкодженні, зокрема є можливість відновити повністю втрачений кластер даних, за умови відсутності помилок на інших кластерах, або відновити до трьох блоків даних на різних кластерах.

Відповідно до використаного методу розроблена поведінкова модель передбачає функціонал відновлення інформації відповідно заявлених вимог. Для створення поведінкової моделі було використано мову опису апаратури інтегральних схем, а саме VHDL. Модель передбачає 5 різних за функціональністю пристроїв, які об'єднуються в одну систему. Під час роботи моделі виконуються такі функції, як розв'язок декількох систем рівнянь, сортування, додавання по модулю два векторів, тощо. Простота та швидкість виконання даних функцій й забезпечує високу потенційну ефективність виконання заданого алгоритму.

Доцільність розробки моделі даної системи відновлення даних полягає у можливому майбутньому її використанні в розподілених системах зберігання даних. Перевага полягає в тому, що модель дозволяє відновити втрачені дані непомітно для користувача, або кластера даних, обчислюваної машини, тощо, адже саме розроблена система повинна першою прийняти потік даних, ідентифікувати його, проаналізувати, у випадку якщо помилки немає, то просто передати його користувачу, інакше відновити дані, якщо це можливо. Відновлення даних потребує наступного: даних, резервних блоків та матриці резервування, яка створювалась при ініціалізації мережі розподіленого зберігання даних та записувалась в пам'ять розробленої системи. У випадку неможливості відновлення даних розроблена система видає відповідний сигнал.

Ключові слова: VHDL, розподілене зберігання даних, резервування даних, відновлення даних.

Anton ANTONIUK, Kostiantyn KOLIADA

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after I. Sikorsky"

BEHAVIORAL MODEL OF DATA BLOCK RECOVERY SYSTEM FOR THEIR REMOTE DISTRIBUTED STORAGE

A behavioral model of the data block recovery system for their remote distributed storage has been developed. The model was created based on the method of data recovery during their distributed storage in remote storage. The used method allows for restoring information in case of its loss or damages it is possible to recover a completely lost data cluster, provided there are no errors on other clusters, or to recover up to three blocks of data on different clusters.

According to the method used, the developed behavioral model provides the functionality of restoring information to the stated requirements. To create a behavioral model, the language of description of integrated circuit hardware was used, namely VHDL. The model provides 5 different devices that combine into one system. During the operation of the model, such functions are performed as solving several systems of equations, sorting, adding two vectors modulo, etc. Simplicity and speed of execution of these functions provide high potential efficiency of execution of the set algorithm.

The feasibility of developing a model of this data recovery system is the possible future use of it in distributed storage systems. The advantage is that the model allows you to recover lost data unnoticed by the user, or a data cluster, computer, etc. because it is the developed system must first receive the data stream, identify it, analyze, and if there is no error - just pass it to the user, otherwise, recover data if possible. Data recovery requires the following: data, backup blocks, and a backup matrix, which was created during the initialization of the distributed storage network and stored in the memory of the developed system. In case of impossibility of data recovery, the developed system gives out the corresponding signal.

Keywords: VHDL, distributed data storage, data backup, data recovery.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Невпинно та постійно збільшуючи швидкість мчить вперед розвиток технологій, а тому з кожним моментом часу стає більше складніших та новітніх технологій. Як наслідок розмір даних, які необхідно зберігати та обчислювати, для забезпечення можливості нових технічних та наукових відкриттів, постійно збільшується. Створення суперкомп'ютерів, які будуть обраховувати фактично нескінченну кількість різних даних, не є можливим на сьогодні, а створення спеціалізованих суперкомп'ютерів є коштовно недоцільним рішенням. Аналогічні проблеми є і з питанням збереження даних. Наразі в світі не існує ще жодного «міста-сервера» в якому б зберігалась величезна кількість інформації, адже будь яка природна катастрофа, або технічна катастрофа може враз зруйнувати величезні здобутки людства, приклад з Олександрівською бібліотекою є вкрай очевидним.

Для подолання проблеми обчислення та зберігання великої кількості даних зараз використовують хмарні технології, або розподілені технології. Тим не менш, ризики втратити ту чи іншу частину інформації

[illegible]

рис. 4 зображено роботу пристрою *DetectOrthogonalMatrixUnit*.

Time	Delta	/DetectOrthogonalMatrixUnit/ChangedAMa... /Det... /Det...
0 ps	0	(0U??U?U?U?U?U?U?U?U?U?U?U?UUUUUU) 3 (UUUU)
0 ps	1	(0U??U?U?U?U?U?U?U?U?U?U?U?UUUUUU) 3 (D784)

SystemOfEquationsCalculateUnit це пристрій, що знаходить індекси резервних блоків частина яких є в ортогональній матриці та створює матрицю як на рис. 5. Перетворивши праву матрицю в одинарну ми отримаємо розв'язок лінійного рівняння в лівій частині.

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1						
		1				
				1		

Засновуючись на результатах рівняння формує синдроми для знаходження блоків даних. На рис. 6 зображено роботу пристрою *SystemOfEquationsCalculateUnit*.

MissedDataGeneratorUnit це пристрій, що за допомогою синдрому та відновлює втрачені блоки даних. На рис. 7 зображено роботу пристрою *DetectOrthogonalMatrixUnit*.

Time	Delta	/MissedDataGeneratorUnit/DataBlocks	/MissedDataGenerat... /Missed...	/Missed...	/MissedDataGeneratorUnit/Sy...	/MissedDat...	/MissedDataGener...
0 ps	0	(UUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUUU)	(010E0F04060500)	8	(41080)	(28A80A29C131A800000)	(A842800) (010E0F04060500)
0 ps	1	(UUU0203040506UU0809UA0BUU0D0EU0FU0111213)	(010E0F04060500)	8	(41080)	(28AB0A29C131A800000)	(A842800) (010E0F04060500)
1000 ps	1	(U0203040506070809UA0BC0DE0EF0111213)	(010E0F04060500)	8	(41080)	(28ABA0A29C131A800000)	(A842800) (010E0F04060500)

Змодельовану систему пропонується приладнати в якості буферного пристрою на виході даних між мережею кластерів та кінцем вузлом запиту до користувача. Наприклад, при запиті до розподіленої бази даних користувач запитує певні дані, у випадку якщо при видачі даних користувачу є всі дані, то дані одразу видаються, однак, якщо присутні помилки, то спочатку дані відновлюється, якщо це можливо, а потім видаються користувачу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеної роботи було розроблено поведінкову модель системи відновлення блоків даних при їх віддаленому розподіленому зберіганні. Заснована на використанні методу відновлення даних при їх розподіленому зберіганні на віддалених сховищах, вона дає широкі можливості для відновлення втраченої інформації.

Можливість відновлювати дані з тимчасово чи назавжди втраченого кластера інформації, що містить в собі певну кількість блоків даних є надзвичайно вагомим фактором, окрім того, можливість відновлювати три блоки даних на різних кластерах, а також сповіщення про неможливість відновлення інформації взагалі – дає гарний потенціал для впровадження даної системи в системи розподіленого зберігання даних.

Спосіб, яким пропонується впровадження цієї системи в структуру кластера даних, а саме, використання розробленої системи, як буферної, закладає ще одну перевагу в використанні даної конфігурації – непомітне для користувача, чи кінцевої програми, отримання всіх даних, разом з відновленими даних.

Література

1. Коляда К.В., Романкевич В.О., Орлова М.М., Марковський О.П. Метод відновлення даних при їх розподіленому зберіганні на віддалених сховищах. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2020. – 40. – С. 44–50.
2. Blaum M., James Lee Hafner, Steven Hetzler (2013). Partial MDS Codes and Their Application to RAID Type of Architectures, IEEE Trans. Inf. Theory. vol. 59, no. 7, P. 4510–4519.
3. Антонюк А.А., Коляда К.В. Поведінкова модель метода відновлення даних на віддалених розподілених системах збереження. Topical issues of modern science, society and education. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. SPC — Sci-conf.com.ua. Kharkiv, Ukraine. 2022. С. 411–414.
4. Коляда К.В., Марковський О.П., Саверченко В.Г., Торошанко А.І. Метод резервування та відновлення втрачених даних в глобальних мережах. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2020. № 1 (66). С. 4–14.

References

1. Koliada K.V., Romankevych V.O., Orlova M.M., Markovskiy O.P. Metod vidnovlennia danykh pry yikh rozpodilenomu zberihanni na viddalenykh skhovyshchakh. Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. – 2020. – 40. – S. 44–50.
2. Blaum M., James Lee Hafner, Steven Hetzler (2013). Partial MDS Codes and Their Application to RAID Type of Architectures, IEEE Trans. Inf. Theory. vol. 59, no. 7, P. 4510–4519.
3. Antoniuk A.A., Koliada K.V. Povedinkova model metoda vidnovlennia danykh na viddalenykh rozpodilenykh systemakh zberezhenia. Topical issues of modern science, society and education. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. SPC — Sci-conf.com.ua. Kharkiv, Ukraine. 2022. S. 411–414.
4. Koliada K.V., Markovskiy O.P., Saverchenko V.H., Toroshanko A.I. Metod rezervuvannia ta vidnovlennia vtrachenikh danykh v hlobalnykh merezhakh. Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. 2020. № 1 (66). S. 4–14.

ГАГЕН В. А.

Черкаський державний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8427-3978>e-mail: valentine.hagen@gmail.com

ПРОЕКТУВАННЯ АРХЕТИПОВОЇ МОДЕЛІ СЕМАНТИЧНОЇ СУМІСНОСТІ МЕДИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Наведені причини необхідності досягнення семантичної сумісності медичних записів та інформаційних систем. Визначено, що семантична сумісність є критичним фактором ефективності систем обміну медичною інформацією. Запропоновано архетипову модель семантичної сумісності. Для цього було створено дві моделі: локальну та глобальну. Глобальна модель ознак визначатиме функції, загальні для всіх МІС, тоді як локальна модель характеристик визначатиме особливості, характерні для певної системи. Розроблено DEAR модель для опису предметної області. Спираючись на отриману модель предметної області спроектуємо модель ознак (функціональну модель) системи обміну медичною інформацією. Модель поведінки EART складається з наступних компонентів: E — об'єкт, A — дія, R — реакція, а T — час. Розроблено локальну та глобальну моделі функцій, на основі яких представлено модель поведінки системи, на основі якої було розроблено структуру моделі архетипів. Подібно до моделі ознак, модель архетипів складається з двох рівнів: локального та глобального. Архетип запропоновано представити як суму трьох параметрів: назви, типу та опису.

Ключові слова: медична інформаційна система, цифрові медичні записи, ефективність медичних систем

Valentyn HAHEN

Cherkassy State Technological University

ARCHETYPICAL MODEL OF SEMANTIC COMPATIBILITY OF MEDICAL INFORMATION SYSTEMS PROJECTING

There are a few different ways to think about semantic compatibility in the context of electronic health records (EHRs). One way to think about it is in terms of the structure of the data. This would involve making sure that the data is organized in a way that is consistent with how other systems expect it to be organized. Another way to think about it is in terms of the meaning of the data. This would involve making sure that the data is annotated in a way that is consistent with how other systems expect it to be annotated. A third way to think about semantic compatibility is in terms of the use of the data. This would involve making sure that the data is used in a way that is consistent with how other systems expect it to be used. Each of these approaches has its own strengths and weaknesses. The approach that is most appropriate will depend on the specific context in which the EHR is being used. The structure of the data is the most important factor to consider when thinking about semantic compatibility. This is because the structure of the data determines how the data is organized and how it is accessed. If the structure of the data is not compatible with the structure of other systems, then the data will not be accessible to those systems. The meaning of the data is also important to consider when thinking about semantic compatibility. This is because the meaning of the data determines how the data is interpreted. If the meaning of the data is not compatible with the meaning of other systems, then the data will not be interpreted correctly by those systems. The use of the data is also important to consider when thinking about semantic compatibility. This is because the use of the data determines how the data is used. If the use of the data is not compatible with the use of other systems, then the data will not be used correctly by those systems. In general, the most important factor to consider when thinking about semantic compatibility is the structure of the data. The meaning of the data and the use of the data are also important factors to consider, but they are not as important as the structure of the data.

Keywords: medical information system, data exchange, semantic compatibility

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Семантичною сумісністю прийнято називати здатність систем обмінюватися даними та інтерпретувати інформацію, одночасно дозволяючи використовувати інформацію в системах без втручання користувача та без додаткових домовленостей між різними зацікавленими сторонами [1]. Цілями семантичної сумісності є рівномірне розпізнавання та обробка семантично-еквівалентної інформації, навіть якщо мова йде про велику кількість інформації або неоднорідні дані [2]. Тому, спочатку потрібно дотриматися правил синтаксичної сумісності. Семантична сумісність потребує загальної еталонної моделі для представлення медичних даних для МІС (медичних інформаційних систем), узгодженої структури клінічних даних (тобто однакового розуміння термінології, наприклад, онтології та словника даних) та спільної системи клінічної термінології [3]. Адже для того, щоб системи могли ефективно взаємодіяти одна з одною, вони повинні мати спільне розуміння значення інформації, якою вони обмінюються [4]. Отже, семантична сумісність МІС є критичним фактором для розрахунку ефективності систем обміну медичною інформацією (COMI). Для того, щоб медичні системи могли обмінюватися даними, вони повинні мати можливість інтерпретувати значення даних, що передаються. Це може бути проблемою, оскільки значення даних в різних МІС можуть відрізнятися. Системи повинні бути семантично сумісні, щоб гарантувати, що дані інтерпретуються правильно.

Формулювання цілей статті

Мета роботи полягає в створенні архетипової моделі семантичної сумісності для того, щоб покращити точність передачі медичної інформації між інформаційними системами в системі обміну медичною інформацією «Елемент».

Архетипові моделі семантичної сумісності. Одним із способів покращити сумісність систем EHR є використання архетипових моделей. Архетипова модель — це модель того, як повинен працювати певний тип системи. Було показано, що використання архетипових моделей покращує сумісність систем в інших областях, таких як фінанси та виробництво [5]. Отже, для того, щоб створити інформаційну систему підвищення якості надання медичних послуг, потрібно розробити архетипову модель семантичної сумісності. Для цього нам спочатку потрібно зрозуміти поняття доменної моделі. Потім ми створимо модель ознак/функцій, що буде розділена на два рівні: глобальний і локальний. Глобальна модель ознак визначатиме функції, загальні для всіх МІС, тоді як локальна модель характеристик визначатиме особливості, характерні для певної системи.

Область знань в медичній галузі є складною і багатогранною. Щоб створити ефективну архетипову модель для СОМІ, необхідно створити модель предметної області. Дана модель буде спрощенням реальної області. Вона включатиме лише концепції та відносини, які мають відношення до завдання розробки архетипової моделі семантичної сумісності для СОМІ.

Модель предметної області буде складатися з трьох типів понять: об'єктів, атрибутів та відносин. Об'єкти — це речі, які існують у предметній області, наприклад пацієнти, постачальники та ліки. Атрибутами є властивості об'єкта, наприклад ім'я пацієнта або дозування ліків. Відносини — це відносини між об'єктами, наприклад відносини між пацієнтом і постачальником.

Визначившись зі структурою моделі, потрібно вказати кількість різних типів об'єктів та атрибутів у нашій предметній області. Для цього використаємо принцип об'єктно-орієнтованого програмування і створюємо клас для кожного об'єкта та атрибута. У цьому випадку ми маємо такі класи:

- Клас *пацієнт*: ім'я, вік, стать;
- Клас *постачальник*: назва;
- Клас *ліки*: назва, дозування;
- Клас *відносини*: пацієнт-постачальник, пацієнт-лікар.

Останнє припущення полягає в тому, що всі об'єкти пов'язані відносинами. Іншими словами, кожен об'єкт має принаймні одне відношення з іншим об'єктом. Це припущення важливо для побудови мережевої моделі предметної області. Виходячи з цього, можна сказати, що запропонована модель являє собою мережу взаємопов'язаних об'єктів. Тепер ми маємо всі необхідні дані для побудови моделі предметної області. Побудуємо DEAR-модель предметної області:

$$D = \{E, A, R\},$$

де параметр D – відповідає за предметну область, E – за об'єкти, A – за атрибути, а R – за відносини між сутностями. В свою чергу, параметри {E, A, R}, складаються з наступних об'єктів, атрибутів та відносин:

$$E = \{\text{пацієнт, провайдер, ліки}\}$$

$$A = \{\text{ім'я пацієнта, вік пацієнта, стать пацієнта, назва ліків, дозування}\}$$

$$R = \{\text{пацієнт – провайдер, пацієнт – ліки}\}$$

Основна мета моделі предметної області – спростити складності медичної галузі, щоб їх можна було краще зрозуміти та проаналізувати з використанням інструментів комп'ютерного моделювання. Щоб створити модель, яка точно представляє предметну область, необхідно зробити ряд припущень. Ці припущення зроблені для спрощення області до рівня, необхідного для проектування СОМІ.

Перше припущення полягає в тому, що кожен об'єкт може мати кілька атрибутів. Це припущення дозволяє точніше уявити реальність, оскільки кожен об'єкт у світі має кілька властивостей. На основі даного припущення розширимо нашу модель представлення атрибутів:

$$A = \begin{cases} A_1 = \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1i}\} \\ \dots \\ A_n = \{A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{ni}\} \end{cases},$$

Друге припущення полягає в тому, що існує функція, яка описує відносини між об'єктами. Ця функція необхідна для того, щоб точно відобразити складну мережу відносин між різними об'єктами предметної області. Отже, враховуючи структуру моделі та вище зазначені припущення, запропоновано наступний варіант математичного представлення даної моделі:

$$D = \begin{cases} E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\} \\ A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\} \\ R = \{R(E_1 E_2), \dots, R(E_1 E_n)\} \end{cases},$$

де $\{E_1, \dots, E_n\}$ – перелік всіх об'єктів предметної області, а кожному об'єкту E_n відповідає атрибут A_n , а також існує така функція R, що описує зв'язки між даними об'єктами. Представимо графічне зображення DEAR-моделі (Рис. 1).

Спираючись на отриману модель предметної області спроектуємо модель ознак (функціональну модель) СОМІ. Функціональна модель є моделлю функціональності МІС. Вона використовується для визначення функцій, які є загальними для всіх медичних систем. Згідно Рис. 1, функціональна модель буде розділена на два рівні: глобальний і локальний. Глобальна модель ознак визначатиме функції, спільні для

всіх МІС. Модель локальних функцій визначатиме особливості, характерні для окремих МІС. Отже, функціональна модель може бути представлена наступним чином:

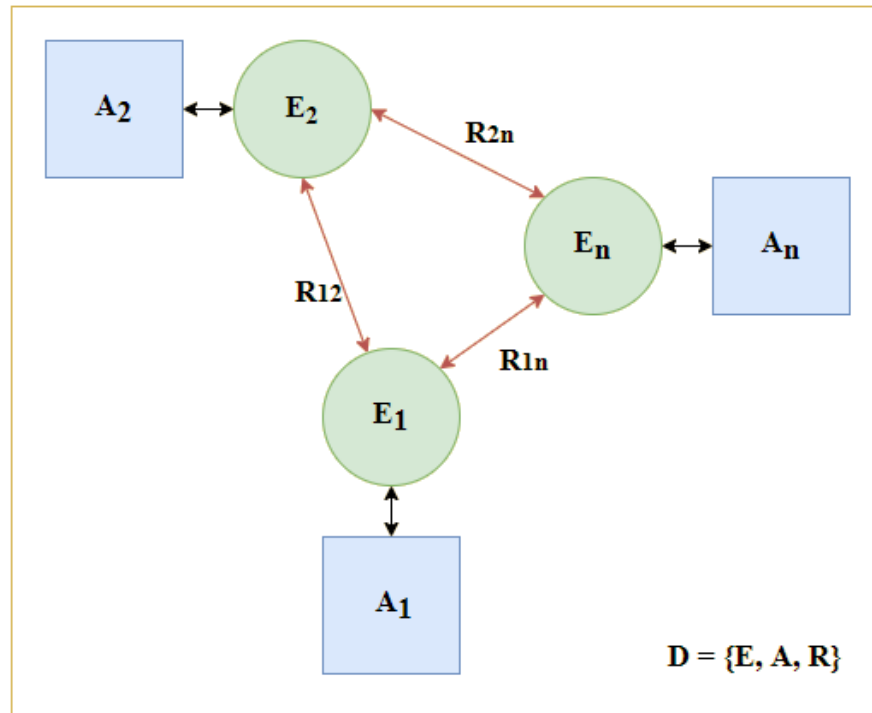


Рис. 1. Модель предметної області

$$FM = GFM + LFM,$$

де FM відповідає за функціональну модель, GFM – глобальна модель функцій, а LFM – локальна модель функцій. Припустимо, що GFM має наступний вигляд:

$$GFM = \{G_1, G_2, \dots, G_n\},$$

де параметри $\{G_1, \dots, G_n\}$ відповідають за глобальні функції МІС. Тоді, аналогічно представимо локальну модель:

$$LFM = \{L_1, L_2, \dots, L_n\},$$

де $\{L_1, \dots, L_n\}$ – локальні функції окремих МІС. Отже, модель ознак для COMI «Елемент» може бути представлена графічно наступним чином:

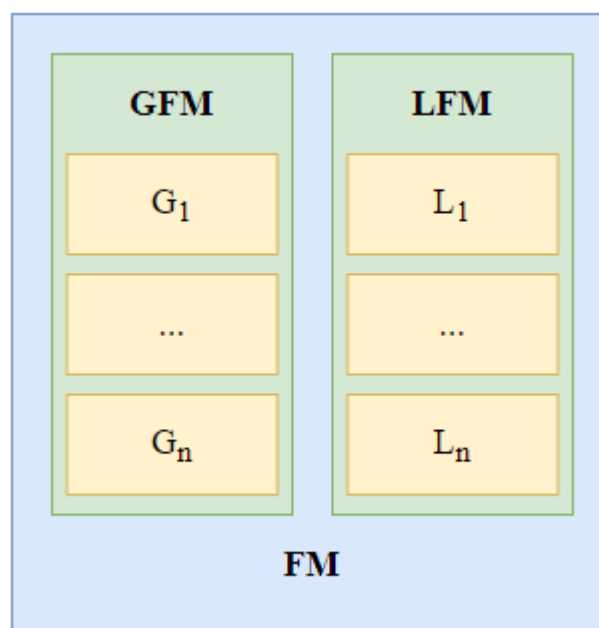


Рис. 2. Модель ознак COMI

Основною перевагою моделі ознак є те, що вона дозволяє створити онтологію для МІС, що дозволить формалізувати процес обміну медичною інформацією. Крім того, використання онтології дозволить створити більш ефективну СОМІ [6].

Глобальна модель функцій буде включати такі функції:

- **Інформація про пацієнта:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію про пацієнта, таку як ім'я, адреса та дата народження.
- **Інформація про постачальника:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію про постачальника, таку як ім'я, адреса та спеціальність.
- **Інформація про ліки:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію про ліки, таку як назва, дозування та побічні ефекти.
- **Інформація про алергію:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію про алергію, таку як назва, тяжкість та симптоми.
- **Інформація про діагноз:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію про діагноз, таку як ім'я, код та опис.
- **Інформація про процедури:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію про процедуру, таку як назва, код та опис.
- **Інформація про аналізи:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та редагувати інформацію тесту, таку як назва, код та опис.

Модель локальних функцій буде включати такі функції:

- **Планування зустрічей:** ця функція дозволить користувачеві планувати, перепланувати та скасовувати зустрічі з пацієнтами, постачальниками та лікарями.
- **Рахунки та страхування:** ця функція дозволить користувачеві переглядати та оплачувати рахунки, а також оновлювати інформацію про страхування.
- **Керування рецептами:** ця функція дозволить користувачеві заповнювати рецепти та керувати ними.
- **Управління запасами:** ця функція дозволить користувачеві відстежувати і керувати рівнем запасів (як для лікарень, так і для аптечних закладів).
- **Поповнення за рецептом:** ця функція дозволить користувачеві запитувати поповнення за рецептом.
- **Лабораторні результати:** ця функція дозволить користувачеві переглядати результати лабораторних досліджень.
- **Електронні медичні картки:** ця функція дозволить користувачеві отримувати доступ та оновлювати електронні медичні картки пацієнтів.

Отже, спираючись на функціональну модель СОМІ, сформуємо наступні функції, що будуть використані в системі «Елемент» на глобальному та локальному рівнях:

Таблиця 1

Функції системи «Елемент»

№ п/п	Глобальний рівень	Локальний рівень
1.	Функція перегляду та аналізу медичної інформації	Функція надання медичної інформації лікарям
2.	Функція зберігання медичної інформації	Функція надання медичної інформації пацієнтам
3.		Функція надання медичної інформації медичного персоналу

Фінальним етапом при створенні моделі ознак СОМІ є створення моделі поведінки системи. Модель поведінки — це модель, яка характеризує поведінку об'єктів у системі. Модель поведінки використовується для ідентифікації поведінки об'єктів у системі. Дана модель може бути представлена у вигляді набору площин:

$$\langle E, A, R, T \rangle,$$

де E — об'єкт, A — дія, R — реакція, а T — час. Об'єкт E — це об'єкт, поведінка якого характеризується. Дія A — це дія, що виконується об'єктом E над іншими об'єктами в системі. Реакція R — це реакція інших об'єктів системи на дію A об'єкта E . Час T — це час, протягом якого відбуваються дія A та реакція R .

Модель поведінки може бути представлена у вигляді орієнтованого графа. У орієнтованому графі вузли відповідають об'єктам, а ребра — діям. Орієнтований граф показано на рис. 3.

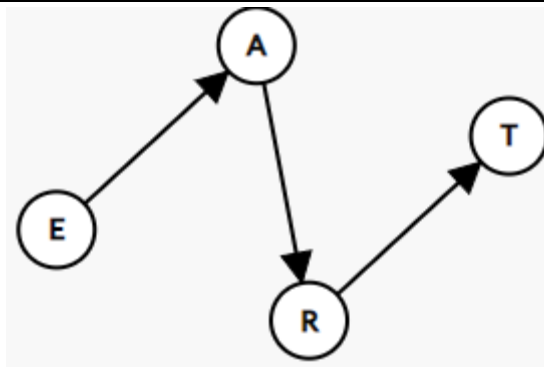


Рис. 3. Орієнтований граф моделі поведінки

Згідно з Таблицею 1 модель поведінки складається з чотирьох об'єктів: пацієнта, лікаря, медичного персоналу та інформаційної системи. Пацієнт – це суб'єкт, поведінка якого характеризується. Лікар – це особа, яка взаємодіє з пацієнтом. Медичний персонал – це суб'єкт, який взаємодіє з лікарем. Інформаційна система – це суб'єкт, який взаємодіє з медичним персоналом.

Пацієнту проводяться наступні дії:

- запитувати медичну інформацію;
- отримувати медичну інформацію.

Лікар проводить такі дії:

- надання медичної інформації пацієнту;
- надання медичної інформації медперсоналу.

Медичний персонал виконує такі дії:

- надання лікарю медичної інформації;
- надання медичної інформації до інформаційної системи.

Інформаційна система виконує такі дії:

- надання медичної інформації медичним працівникам;
- зберігання медичної інформації.

На основі функціональної моделі ми пропонуємо знакову модель поведінки COMI. Дана модель — це математична модель поведінки системи. Вона відображає поведінку системи в процесі її функціонування. Модель поведінки COMI побудована на основі функціональної моделі та онтологічної моделі COMI. Вона визначає поведінку системи в процесі функціонування системи і може бути представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, z, t); \\ \frac{dy}{dt} = g(x, y, z, t). \end{cases}$$

Де X – множина всіх об'єктів системи, Y – множина всіх подій системи, Z – множина всіх станів системи, t – час, S – множина всіх ознак системи, f – сукупність усіх функцій системи, g – множина всіх предикатів системи. Предикат — це функція, яка повертає логічне значення (0 чи 1). У контексті системи предикат є функцією, яка визначає стан системи. Предикати використовуються для опису умов, за яких система працює. Наприклад, предикат може використовуватися для опису стану, за якого пацієнт отримує медичну інформацію:

Отримати – медичну – інформацію (пацієнт, лікар, інформаційна система)

Цей предикат істинний, коли пацієнт отримує медичну інформацію від лікаря через інформаційну систему.

Системні функції використовуються для опису дій, які виконує система. Наприклад, таку системну функцію можна використовувати для опису дії надання медичної інформації пацієнту:

Надати – медичну – інформацію (пацієнт, лікар, інформаційна система)

Ця функція виконується, коли лікар надає медичну інформацію пацієнту через інформаційну систему.

Отже, фінальним етапом розробки моделі семантичної сумісності МІС є розробка моделі архетипів, що базується на моделях предметної області та моделі ознак. Подібно до моделі ознак, модель архетипів складається з двох рівнів: локального та глобального. Модель глобального архетипу визначає архетипи, загальні для всіх медичних систем, в той час як модель локального архетипу визначає архетипи, характерні для певної медичної системи. Модель архетипу використовується для порівняння особливостей певної медичної системи з архетипами, які існують у медичній сфері. Запропонуємо наступну структуру моделі архетипів (Рис. 4):

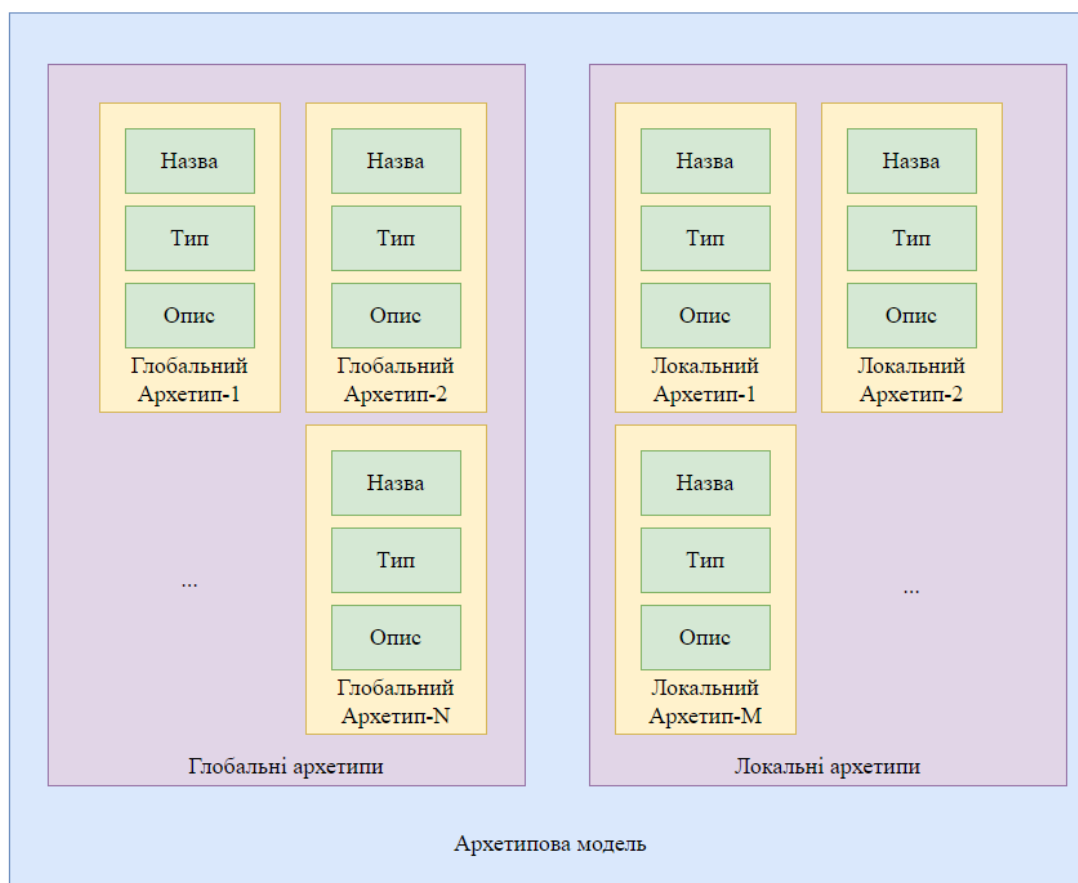


Рис. 4. Структура моделі архетипів

Кожен окремий архетип, будь то локальний чи глобальний матиме однакову архітектуру і може бути представлений за допомогою таких параметрів як назва, тип та опис:

$$\text{АРХЕТИП} = \langle \text{НАЗВА}, \text{ТИП}, \text{ОПИС} \rangle$$

Отже, структура запропонованої архетипової моделі складається з наступних елементів:

- Назва: назва архетипу. Назва архетипу використовується для ідентифікації архетипу.
- Тип: тип архетипу, який може відповідати стану, лікуванню або іншій медичній концепції. Тип архетипу використовується для категоризації архетипу.
- Опис: опис архетипу, який включатиме його визначальні характеристики. Опис архетипу використовується для характеристики архетипу.
- Модель глобального архетипу: модель архетипів, спільних для всіх медичних систем.
- Модель локального архетипу: модель архетипів, характерних для певної медичної системи.

Згідно заданої структури приведемо приклад локальних та глобальних архетипів для сфери охорони здоров'я:

Таблиця 2

Локальні та глобальні архетипи в галузі охорони здоров'я

№ п/п	Назва	Тип	Опис	Класифікація
1.	Пацієнт	Особа	Особа, яка отримує медичну допомогу.	Глобальний архетип
2.	Зустріч	Подія	Подія, під час якої пацієнт отримує медичну допомогу.	Глобальний архетип
3.	Діагноз	Концепт	Концепція, що представляє хворобу або стан.	Глобальний архетип
4.	Гострий інфаркт міокарда	Стан	Стан, що характеризується раптовою смертю частини серцевого м'яза через нестачу кисню.	Локальний архетип
5.	Аортокоронарне шунтування	Лікування	Лікування ішемічної хвороби серця, що включає хірургічне обхід заблокованої або пошкодженої ділянки артерії.	Локальний архетип
6.	Цукровий діабет	Стан	Стан, що характеризується високим рівнем цукру в крові.	Локальний архетип

Припустимо, що існує n-глобальних архетипів та m-локальних. Отже, враховуючи запропоновану структуру архетипової моделі, модель кожного окремого архетипу представимо повну модель архетипів за допомогою наступної формули:

$$A = \sum_{i=0}^n AG_i + \sum_{i=0}^m AL_i,$$

Де А – повна модель архетипів, AG – модель глобального архетипу, AL – модель локального архетипу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Існує ряд різних способів, завдяки яким МІС можуть бути сумісні одна з одною. Одним із способів є використання архетипових моделей, які в основному є шаблонами, які можна використовувати для забезпечення узгодженості даних у різних системах. Іншим способом є використання методів відображення, які передбачають створення карти того, як дані організовані в одній МІС, а потім використання цієї карти для керування процесом введення даних в іншій системі МІС. Також можна використати стандартизацію даних – тоді усі медичні системи будуть використовувати однакову термінологію та системи кодування. Однак, для СОМІ «Елемент» найбільш підходящим методом є застосування архетипових моделей. Для того, щоб подобувати архетипову модель була розроблена DEAR-модель предметної області, де параметр D – відповідає за предметну область, E – за об'єкти, A – за атрибути, а R – за відносини між сутностями. Розроблено функціональну модель, яка складається з моделей локальних та глобальних функцій, розроблено EART модель поведінки системи, де E – об'єкт, A – дія, R – реакція, а T – час. Об'єкт E – це об'єкт, поведінка якого характеризується. Побудовано математичну модель поведінки системи. Вона відображає поведінку системи в процесі її функціонування на основі чого побудовано структуру моделі архетипів та модель архетипу, що складається з назви, типу та опису.

Література

1. Kopanitsa G. Integration of hospital information and clinical decision support systems to enable the reuse of electronic health record data. *Methods Inf Med*. 2017. № 56. P. 238–47.
2. Roehrs A., da Costa CA, Righi R da R. Toward a Model for Personal Health Record Interoperability. *IEEE j biomed health informatics*. 2019. № 23. P. 867–873.
3. Martínez-Costa C., Menárguez-Tortosa M., Fernández-Breis J.T. An approach for the semantic interoperability of ISO EN 13606 and OpenEHR archetypes. *J Biomed Inform*. 2010. № 43. P. 736–746.
4. Benson T., Grieve G. Why Interoperability Is Hard. In: *Principles of Health Interoperability*. Springer, Cham. 2021. № 4. P. 21–40.
5. David Moner, Jose A Maldonado, Montserrat Robles. *Archetype Modeling Methodology*. *Journal of Biomedical Informatics*. 2018. URL: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-biomedical-informatics>.
6. Bouanani-Oukhaled Zahra, Verdier Christine, Dupuy-Chessa Sophie. *Ontological Model for EHR Interoperability*. *Studies in health technology and informatics*. 2016. № 226. P. 147–150.

ГУРМАН І. В.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2282-3484>e-mail: devastator192@gmail.com

МОТОРНИЙ П. В.

Хмельницький національний університет

e-mail: pmotomiy.panda@gmail.com

ЧЕШУН В. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3935-2068>e-mail: cheshunvn@khmnu.edu.ua

ДЖУЛІЙ А. В.

Університет економіки і підприємництва, м.Хмельницький

<https://orcid.org/0000-0001-5011-3052>e-mail: kksmkhnu@gmail.com

ЧОРНЕНЬКИЙ В. І.

Університет економіки і підприємництва, м.Хмельницький

<https://orcid.org/0000-0002-0576-7097>e-mail: vitnel@ukr.net

АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ДИСКРЕТНИХ ТЕСТІВ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ТЕОРІЙ

В роботі представлено варіант реалізації алгоритму синтезу дискретних із застосуванням теорії генетичних алгоритмів. Алгоритм орієнтовано на зменшення кількості необхідних перевірок об'єкта діагностування за рахунок генерації нових популяцій тестів, що зберігають перевірку здатності початкової послідовності в меншій кількості тестів-нащадків цієї послідовності, що утворюються за алгоритмом.

Ключові слова: технічна діагностика, генетичні алгоритми, синтез тестів, цифрові пристрої.

Ivan GURMAN, Pavlo MOTORNYI, Viktor CHESHUN

Khmelnitskyi National University

Andrii DZHULIY, Vitalii CHORNENKYI

University of Economics and Entrepreneurship, Khmelnytskyi

ALGORITHM OF SYNTHESIS OF DISCRETE TESTS BASED ON EVOLUTIONARY THEORIES

The complexity of modern digital components and devices as objects of diagnosis, in most cases, makes it impossible for experts to synthesize tests manually in the time allowed to solve the problem of organizing diagnostic tests. This determines the relevance of the development and implementation of intelligent methods and tools for automated synthesis of test sequences. One of the promising options for the synthesis and optimization of discrete tests is the solution of this problem based on the theory of evolution or genetic algorithms.

The paper describes an algorithm for the synthesis of discrete tests using genetic algorithms. The algorithm of realization of diagnostic experiment contains stages of formation of initial population, crossing, processing of the received results and check of a condition of a stop of work of genetic algorithm. The main characteristics of the algorithm: the type of evolutionary algorithms used - hybrid; method of generating binary words of chromosome codes by crossing operator from values of diagnostic vectors of elementary tests; the method of selection of applicants for crossing - proportional, based on the probability function of fitness and the control operator of the compatibility assessment; type of crossover operator - uniform; the method of forming a new generation - the descendants of crosses of individuals based on the results of proportional selection and elitistly selected individuals that do not allow crossings under the control operator of compatibility assessment; the main way to stop the evolutionary algorithm - the loss of the ability to implement crossings of individuals in the resulting generation; additional (possible) ways to stop the algorithm - limiting the execution time or the number of iterations (generated generations).

Key words: technical diagnostics, genetic algorithms, synthesis of tests, digital devices.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Задача синтезу тестів для діагностування дискретних пристроїв і систем з елементами високого ступеня інтеграції ніколи не втрачала актуальності і навпаки, актуальність вказаної задачі завжди загострювалась з появою нових інтегральних компонентів та технологій їх виготовлення.

Складність діагностованих дискретних схем, в більшості випадків, унеможливорює безпосередній синтез тестів для перевірки об'єкта діагностування (ОД) в цілому з нуля за допустимий для вирішення завдання організації діагностичних випробувань час. Через потребу враховувати велику кількість факторів та параметрів, на сьогоднішній день розробка якісних тестів для перевірки сучасних електронних компонентів надвисокого ступеня інтеграції та електронної продукції на їх основі за фінансовими і часовими витратами значно перевищує вартість самих виробів, що зумовлює зацікавленість фахівців з технічної діагностики у застосуванні інтелектуальних засобів автоматизації синтезу тестів [2–4]. Одним із напрямків підвищення ефективності синтезу дискретних тестів є застосування еволюційних теорій, зокрема, генетичних алгоритмів [4–10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Генетичні алгоритми (ГА) як ефективний інструмент набули широкого застосування в задачах технічної діагностики. Один із основних напрямків їх застосувань в задачах технічної діагностики – оптимізація тестових послідовностей і алгоритмів діагностування [4, 6, 7]. В [8] описуються застосування ГА для відсіву надлишкових тестів з тестових послідовностей. В [9] ГА застосовуються для оптимізації вибору контрольних точок ОД для реалізації тестових випробувань, а також для дослідження і модифікації структури ОД.

В роботі [10] описуються базові принципи застосування ГА для синтезу дискретних тестів. Зокрема, визначено спосіб представлення даних для синтезу тестів на основі еволюційних теорій, обґрунтовано вибір рівномірного кросінгвера із застосуванням пари векторів рекомбінації, запропоновано функції відбору хромосом для схрещування та формули генерації хромосом та векторів рекомбінації нового покоління. Отримані результати позиціонуються як основа для алгоритмічної реалізації методу.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення принципів алгоритмічної реалізації методу синтезу дискретних тестів на основі еволюційних теорій.

Виклад основного матеріалу

При розгляді алгоритмічної реалізації задач синтезу тестів використаємо елементи математичної моделі, наведеної в [10]: $L: \{l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_k\}$ – множина можливих несправних технічних станів ОД; $P: \{P(l_1), P(l_2), \dots, P(l_i), \dots, P(l_k)\}$ – множина значень статистичних даних імовірності знаходження ОД в кожному з можливих технічних станів ОД $l_i \in L$; $T: \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m\}$ – множина тест-векторів, розроблених для ідентифікації станів ОД $l_i \in L$; $R: \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}$ – множина отримуваних векторів відповідних реакцій при поданні на ОД блоку тест-векторів $t_i \in T$; $C: \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m\}$ – множина хромосом початкової популяції C для реалізації ГА. Цільовою сферою застосування еволюційних теорій в розроблюваному алгоритмі є синтез тестів на основі наявної множини тест-векторів елементарних перевірок T , орієнтованих на суміщення декількох елементарних перевірок тестами $t_i \in T$ і $t_j \in T$ (при $i \neq j$) в часі для реалізації узгодженої одночасної перевірки складових ОД та зменшення тривалості процесу тестових випробувань.

Алгоритм:

1. Ввести дані про можливі несправні стани ОД $l_i \in L$.
2. Визначити K як кількість можливих несправних станів ОД: $K = |L|$.
3. Ввести дані статистичних ймовірностей $P(l_i)$ знаходження ОД в кожному з можливих несправних станів $l_i \in L$ (сформувати множину значень статистичних даних ймовірностей $P: \{P(l_1), P(l_2), \dots, P(l_i), \dots, P(l_k)\}$).
4. Ввести дані тест-векторів $t_i \in T$ і векторів відповідних реакцій $r_i \in R$ (сформувати множини значень тест-векторів $T: \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m\}$ і векторів відповідних реакцій $R: \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}$).
5. Визначити параметр M як кількість тестових випробувань, що можуть бути реалізовані на основі наданих діагностичних даних: $M = |T| = |R|$.
6. Прийняти значення внутрішнього лічильника i рівним одиниці: $i = 1$.
7. Синтезувати значення двійкового коду хромосоми $c_i \in C$:

$$c_i = \text{text}(t_i) + \text{text}(r_i), \quad (1)$$

де c_i – хромосома опису тестової перевірки із застосуванням тест-вектора $t_i \in T$, формована додаванням значень векторів $t_i \in T$ і $r_i \in R$ як символьних рядків (функція text).

8. Виконати інкремент значення внутрішнього лічильника i : $i = i + 1$.
9. Якщо $i \leq M$ (якщо сформовано ще не всі хромосоми), перейти до п. 7.
10. Прийняти ознаку можливості дострокового зупину роботи алгоритму дійсною: $Q = 1$.
11. Реалізувати процедуру визначення умови дострокового зупину алгоритму.
12. Якщо умову дострокового зупину алгоритму задано (обмеження на кількість ітерацій, час роботи алгоритму тощо), перейти до п. 14.
13. Прийняти ознаку можливості дострокового зупину роботи алгоритму не дійсною: $Q = 0$.
14. Сформувати одномірний масив F розмірності $|C|$ для зберігання розрахункових значень функцій пристосованості $f_i \in F$ хромосом $c_i \in C$.
15. Для кожного двійкового коду хромосоми $c_i \in C$ обчислити функцію пристосованості $f_i \in F$:

$$f_j = \sum_{i=1}^{|L|} q_i P(l_i), \quad (2)$$

де f_j – розрахункове значення функції пристосованості особини з кодом хромосоми $c_j \in C$; $|L|$ – розмірність множини можливих несправних технічних станів ОД L ; $P(l_i)$ – імовірність знаходження ОД в несправному технічному стані $l_i \in L$; q_i – ознака здатності тест-вектора $t_j \in T$ виявляти ознаки знаходження ОД в стані $l_i \in L$ ($q_i = 1$ за наявності у тест-вектора $t_j \in T$ відповідної здатності, $q_i = 0$ – за відсутності).

16. Упорядкувати значення двійкових кодів хромосом $c_i \in C$ за відповідними їм значеннями функції пристосованості $f_i \in F$ в порядку від більшого до меншого.
17. Сформувати одномірний масив G розмірності $|C|$ для зберігання ознак g_i участі у схрещуваннях

хромосом $c_i \in C$ з нульовими значеннями елементів $g_i \in G$.

18. Прийняти ознаку реалізації схрещувань рівною нулю: $W=0$.

19. Прийняти значення внутрішнього лічильника $i=1$ (вказівник на першу хромосому $c_i \in C$):

20. Прийняти значення внутрішнього лічильника j більшим на одиницю за значення лічильника i (вказівник на наступну після $c_i \in C$ хромосому $c_j \in C$): $j = i + 1$.

21. Розрахувати ознаку y_{ij} можливості схрещування особин з хромосомами $c_i \in C$ і $c_j \in C$:

$$y_{ij} = (c_i \oplus c_j) \wedge h_i \wedge h_j = 0. \quad (3)$$

22. Якщо $y_{ij}=0$ (схрещування визнане неможливим), перейти до п. 27.

23. Розрахувати значення коду хромосоми c_{ij}^1 особи наступного покоління C^1 і зафіксувати значення c_{ij}^1 в множині C^1 . Для розрахунку застосувати формулу оператора кросингвера:

$$c_k^1 = c_i \vee c_j. \quad (4)$$

24. Розрахувати значення вектора рекомбінації h_{ij}^1 для коду хромосоми c_{ij}^1 особи покоління C^1 і зафіксувати значення h_{ij}^1 в множині H^1 . Для розрахунку застосувати формулу оператора схрещування векторів:

$$h_k^1 = h_i \vee h_j. \quad (5)$$

25. Прийняти ознаку реалізації схрещувань рівною одиниці: $W=1$.

26. Прийняти рівними одиниці ознаки участі у схрещуваннях хромосом $c_i \in C$ і $c_j \in C$: $g_i=1, g_j=1$.

27. Виконати інкремент значення внутрішнього лічильника j : $j = j + 1$.

28. Якщо $j \leq M$ (перебрано ще не всі можливі хромосоми-партнери для $c_i \in C$), перейти до п. 21.

29. Виконати інкремент значення внутрішнього лічильника i : $i = i + 1$.

30. Якщо $i < M$ (якщо лічильник i ще не вказує на останню хромосому $c_i \in C$, тобто, не всі можливі схрещування в поточному поколінні реалізовані), перейти до п. 20.

31. Якщо $W=0$ (ознака реалізації схрещувань свідчить про відсутність схрещувань в останній ітерації), перейти до п. 43.

32. Прийняти значення внутрішнього лічильника i рівним одиниці: $i=1$.

33. Перевірити ознаку g_i участі у схрещуваннях хромосоми $c_i \in C$.

34. Якщо $g_i=1$ (хромосома $c_i \in C$ прийняла участь у схрещуваннях і має щонайменше одного нащадка, що унаслідував її гени), перейти до п. 35.

35. Скопіювати слово двійкового коду хромосоми $c_i \in C$ в множину C^1 і слово відповідного їй двійкового коду вектора рекомбінації $h \in H$ в множину H^1 .

36. Виконати інкремент значення внутрішнього лічильника i : $i = i + 1$.

37. Якщо $i \leq M$ (якщо перебрано ще не всі хромосоми), перейти до п. 33.

38. Виконати заміну батьківської множини C на множину C^1 і, відповідно, множини H на множину H^1 .

39. Перевірити ознаку можливості дострокового зупину роботи алгоритму Q .

40. Якщо $Q=0$ (дострокової зупинки не передбачено), перейти до п. 14.

41. Реалізувати процедуру корекції параметрів та перевірки виконання умови дострокової зупинки роботи алгоритму.

42. Якщо умова дострокової зупинки роботи алгоритму не виконується, перейти до п. 14.

43. Вивести поточну множину C як результат роботи алгоритму.

44. Кінець алгоритму.

Проведемо загальний аналіз запропонованого алгоритму.

Першочергово в алгоритмі передбачене введення діагностичних даних, необхідних для реалізації синтезу дискретних тестів із застосуванням ГА, та визначення на їх основі використовуваних в алгоритмі параметрів K і M (пункти 1–5 алгоритму). Формування необхідної для реалізації ГА множини слів хромосомних кодів осіб першого покоління C виконується за формулою (1) на основі даних множини тест-векторів елементарних перевірок T та множини векторів відповідних реакцій R (пункти 6–9 алгоритму). Після підготовки необхідних вихідних даних для реалізації ГА в алгоритмі настроюються його робочі параметри, а саме, задається умова дострокової зупинки роботи алгоритму (пункти 10–13). Це може бути обмеження на кількість ітерацій, обмеження на час роботи алгоритму тощо. Умова дострокової зупинки може не задаватися, для чого слід прийняти $Q=0$ (пункт 13).

Для реалізації відбору і схрещувань в ГА виконується за формулою (2) оцінка пристосованості хромосом в популяції до реалізації ефективних перевірок ОД. Найбільш пристосованими особинами вважаються ті, що мають здатність перевіряти гіпотезу про знаходження ОД в найбільш ймовірному несправному стані. Отримані значення функцій пристосованості f_i хромосом $c_i \in C$ фіксуються в одномірному масиві F розмірності $|C|$ (пункти 14–15 алгоритму).

Після цього алгоритм 3.1 переходить до виконання ітерацій схрещування хромосомних кодів за правилами виконання ГА. Найкращі потомки очікувані від батьків з максимальними значеннями функції пристосованості, тому їх доцільно схрещувати першочергово. Для зручності відбору значення двійкових кодів хромосом $c_i \in C$ упорядковуються за відповідними їм значеннями функції пристосованості $f_i \in F$ (пункт 16).

Для виявлення особин, які в поточній ітерації не приймали участь в схрещуваннях, і їх збереження в алгоритмі використано одномірний масив G , в якому передбачене зберігання ознак g_i участі у схрещуваннях

хромосом $c_i \in C$ (пункт 17 алгоритму). Під час роботи алгоритму кожній особині, що прийняла участь у схрещуваннях при виконанні поточної ітерації ГА значення ознаки $g_i \in G$ змінюється з нуля на одиницю (пункт 26), що дозволяє, в подальшому, легко відсортувати осіб, що дали потомство, від тих, що виявилися непридатними до створення батьківської пари і народження нащадка.

Кінцевим результатом роботи ГА є отримання популяції, що не передбачає подальших схрещувань. Для виявлення ітерації, на якій схрещування завершуються, в алгоритмі застосовується ознака реалізації схрещувань W , яка на початку ітерації приймається рівною нулю (пункт 18), а при вдалому виконанні схрещування змінює значення на одиницю (пункт 25). Після завершення кожної ітерації ГА аналізується значення цієї ознаки (пункт 32). Якщо схрещувань на ітерації не відбулося ($W=0$), то робота алгоритму завершується. Алгоритм може бути зупинений після закінчення заданого часу виконання або після заданої кількості ітерацій. Перевірка умови дострокової зупинки роботи алгоритму реалізується в пунктах 41-42.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі запропоновано варіант реалізації алгоритму синтезу дискретних тестів із застосуванням теорії генетичних алгоритмів. Алгоритм орієнтовано на зменшення кількості необхідних перевірок об'єкта діагностування за рахунок генерації нових популяцій тестів, що зберігають перевірку здатність початкової послідовності в меншій кількості тестів-нащадків цієї послідовності, що утворюються за алгоритмом.

Література

1. Сакович Л.М., Глухов С.І., Бабій О.С., Гальоса А.О. Методика фізичного діагностування цифрових пристроїв об'єктів радіоелектронної техніки. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 2(62). С. 93–101.
2. Глухов С.І., Толубко В.Б., Вишнівський В.В. Прогнозування залишкового ресурсу інформаційних систем з використанням інтелектуальної системи діагностування. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2019. № 3(55). С. 5–11.
3. Толубко В.Б., Вишнівський В.В., Глухов С.І., Березовська Ю.В. Математичні моделі та алгоритм обробки діагностичної інформації для побудови інтелектуальної системи діагностування радіоелектронної техніки. *Наукові записки Університету новітніх технологій*. 2019. 4(56). С. 5–13.
4. Danilova E. Y., Kovylyayev D. A., Gorodilov A. Y. Advanced Genetic Algorithm for the Embedded FPGA Logic Diagnostic. 2021 *International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Volume 1. P. 95–99.
5. Raja Ben Abdessaleem, Shiva Nejati, Lionel C. Briand, Thomas Stifter Testing vision-based control systems using learnable evolutionary algorithms. *ICSE '18: Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering*, May 2018. P. 1016–1026.
6. Городилов А.Ю. Генетический алгоритм диагностирования цифровых устройств. *Вестник Пермского НПИУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2013. № 7. С. 54–62.
7. Иванов Д.Е. Генетические алгоритмы построения входных идентифицирующих последовательностей цифровых устройств. Донецк: ТОВ «Цифровая типография», 2012. 240 с.
8. Миронов С.В., Сперанский Д.В. Генетические алгоритмы для сокращения диагностической информации. *Автоматика и телемеханика*. 2008. № 7. С. 146–156.
9. Дмитриев Д.В., Соколова Э.С., Капранов С.Н. Адаптация генетических алгоритмов к решению задач назначения точек контроля в объектах с большим числом состояний. *Нейрокомпьютеры*, 2007. № 11. С. 59–64.
10. Бадіміна Л.А., Чешун В. М., Чорненко В. І. Генетичні алгоритми в синтезі діагностичних тестів для цифрових пристроїв. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2018. № 2. С. 92–99.

References

1. Sakovych L.M., Hlukhov S.I., Babii O.S., Halosa A.O. Metodyka fizychnoho diahnostuvannia tsyfrovyykh prystroiv ob'ektiv radioelektronnoi tekhniki. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2020. № 2(62). S. 93-101.
2. Hlukhov S.I., Tolubko V.B., Vyshnivskiy V.V. Prohnozuvannia zalyshkovoho resursu informatsiinykh system z vykorystanniam intelektualnoi systemy diahnostuvannia. *Naukovi zapysky Ukrainshkoho naukovo-doslidnoho instytutu zv'iazku*. 2019. № 3(55). S. 5-11.
3. Tolubko V.B., Vyshnivskiy V.V., Hlukhov S.I., Berезovska Yu.V. Matematychni modeli ta alhorytm obrobky diahnostychnoi informatsii dlia pobudovy intelektualnoi systemy diahnostuvannia radioelektronnoi tekhniki. *Naukovi zapysky Universytetu novitnikh tekhnolohii*. 2019. 4(56). S. 5-13.
4. Danilova E. Y., Kovylyayev D. A., Gorodilov A. Y. Advanced Genetic Algorithm for the Embedded FPGA Logic Diagnostic. 2021 *International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Volume 1. P. 95-99.
5. Raja Ben Abdessaleem, Shiva Nejati, Lionel C. Briand, Thomas Stifter Testing vision-based control systems using learnable evolutionary algorithms. *ICSE '18: Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering*, May 2018. P. 1016-1026.
6. Gorodilov A.Yu. Geneticheskij algoritm diagnostirovaniya cifrovyykh ustrojstv. *Vestnik Permskogo NIPU. Elektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravleniya*. 2013. № 7. S. 54-62.
7. Ivanov D.E. Geneticheskie algoritmy postroeniya vhodnykh identifikiruyushih posledovatel'nostej cifrovyykh ustrojstv. Doneck: TOV «Cifrovaya tipografiya», 2012. 240 s.
8. Mironov S.V., Speranskij D.V. Geneticheskie algoritmy dlia sokrasheniya diaagnosticheskoi informatsii. *Avtomatika i telemehanika*. 2008. № 7. S. 146-156.
9. Dmitriev D.V., Sokolova E.S., Kapranov S.N. Adaptatsiya geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach naznacheniya tocheek kontrolya v obektah s bolshim chislom sostoyanij. *Nejrokompyutery*, 2007. № 11. S. 59-64.
10. Badimina L.A., Cheshun V. M., Chornenkyi V. I. Henetychni alhorytmy v syntezi diahnostychnykh testiv dlia tsyfrovyykh prystroiv. *Vymiriuvalna ta obchysluvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. 2018. № 2. S. 92-99.

ПРАВОРСЬКА Н. І.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6001-3311>e-mail: margana2000007@gmail.com

ГРИПІНСЬКА Н. В.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0103-976X>e-mail: nvhrypynskaN@khmnu.edu.ua

ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА ВИКОРИСТАНІ ОЦІНОЧНІ МЕТРИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЯКІ ПРОВІДИЛИСЬ ПРИ РОЗРОБЦІ МОВНО-НЕЗАЛЕЖНОГО ІНКРЕМЕНТНОГО ДЕТЕКТОРА

При розробці мовно-незалежного інкрементного детектора (МНІДП) важливу роль відіграють проведені експерименти та оціночні метрики, які дадуть змогу проаналізувати результати розробки та придатність розробленого алгоритму та пристрою. Експерименти дадуть також змогу відповісти на питання оцінювання продуктивності розробленого детектора та порівняти його з підходом комерційного рівня SIG з виявлення клонів, для вивчення переваг, які може запропонувати інкрементний підхід. Щоб отримати представлення про продуктивність МНІДП, запропоновано запускати його для п'яти програмних систем (з відкритими кодами), проводячи вимірювання вимог до часу та пам'яті. Також для відповіді на питання розширення та вдосконалення початкового підходу, шляхом використання локально-чутливого хешування (ЛЧХ), виникає необхідність в вимірюванні продуктивності запропонованого розширення на базі ЛЧХ та порівнянні його з продуктивністю МНІДП.

Ключові слова: мовно незалежний детектор, інкрементний підхід, локально-чутливе хешування, експеримент, оціночні метрики

Natalya PRAVORSKA, Nadiia HRYPYNSKA

Khmelnitskyi National University

EXPERIMENTS AND USED EVALUATION METRICS USED IN THE DEVELOPMENT OF A LANGUAGE- INDEPENDENT INCREMENTAL DETECTOR

Experiments and evaluation metrics play an important role in the development of a language-independent incremental detector (MRIP), which will allow to analyze the results of the development and the suitability of the developed algorithm and device. The experiments will also provide an answer to the question of evaluating the performance of the developed detector and comparing it with the commercial SIG approach to clone detection, to explore the benefits that the incremental approach can offer. To get an idea of the performance of MNIDP, it is proposed to run it for five software systems (open source), measuring the requirements for time and memory. Also, to answer the question of expanding and improving the initial approach, by using locally sensitive hashing (LCH), there is a need to measure the performance of the proposed expansion on the basis of LCH and compare it with the performance of MNIP. The experiments conducted in the study provided some useful information based on the evaluation of the effectiveness of the proposed expansion on the basis of LCH. More specifically, in some cases, compared to the implementation of MNIDP, the stage of creating an index in the approach based on LCH was two, and in some cases three times slower. A possible reason for this may be the complexity of the MinHash operation, which is a significant part of the overall LCH scheme. This becomes obvious when you consider that the hashing of each tile for each set of tiles during MinHashing must be performed by k-based hash functions. It was assumed that the process of incremental implementation step on the basis of MNIDP will be much slower, due to the calculation of index records on the fly. However, in the course of the study, opposite results were obtained. In practice, this was justified by the fact that the similarity threshold used did not cause a large number of matches between the source files. To gain a better understanding of its behavior, there is a need for further research into the relationship of runtime required for the incremental implementation step flow based on the LCH and the similarity threshold.

Keywords: language independent detector, incremental approach, locally sensitive hashing, experiment, estimation metrics

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У процесі розробки мовно-незалежного інкрементного детектору постає питання вибір оціночних метрик, та проведення на їх основі експериментів для подальшого аналізу і висновків стосовно придатності використання як запропонованого алгоритму, так і самого пристрою. В роботі [1] автори внесли пропозиції стосовно характеристик, на які необхідно звернути увагу при розробці алгоритмів.

Аналіз досліджень та публікацій

Принципи побудови МНІДП спираються на роботу [2], де авторами запропоновано використовувати індекс клонованої частини коду, який і буде становити основну структуру даних. Також в роботах [3, 4] авторами не тільки розглянуто побудову мовно-незалежного інкрементного детектора, а саме процес виявлення блоків з повторами і надлишковістю при використанні пристрою та його розширення на базі ЛЧХ.

Виклад основного матеріалу

Для уникнення можливих помилок при розробці програмного забезпечення виникає необхідність виявлення дефектів на самих ранніх стадіях життєвого циклу. Саме дефекти можуть стати причиною збільшення витрат (як фінансових, часових і т.п.) при розробці та супроводу ПЗ, особливо, коли виявлення дефектів відбувається на останніх етапах життя програмного продукту. Помилки розробки програмного коду можуть бути припущені навіть досвідченими професіоналами-розробниками. Одними з таких помилок можуть бути клоновані блоки коду (тобто повтори та надлишковості). Через наявності великої кількості дубльованих частин коду з'являється можливість виникнення низки різноманітних проблем в вихідному коді системи. Збільшення розміру кодової бази, і відповідно, збільшення затрат на обслуговування, зокрема, є наслідком дублювання [1].

Важливим аспектом стає наявність інструментів для проведення аналізу вихідного коду. На сьогодні існує велика кількість подібних інструментів, але на жаль вони виконують дуже багато зайвих операцій та мають залежність від мови програмування. Прикладом може бути автоматизований інструмент, розроблений групою вдосконалення програмного забезпечення SIG. Детектор цієї компанії, використовуючи перелік заздалегідь визначених критеріїв, серед яких є складність коду та його обсяг, зв'язок між модулями і тому подібне, дає можливість оцінити ремонтпридатність розробленого програмного продукту. Згадані критерії покладено в основу роботи детекторів виявлення блоків з повторами та надлишковістю. Доля дубльованого коду в кодовій базі розробленого проекту може бути визначені спираючись на отримані від детектора результати. Детектор повторів із реальною застосовністю слів розроблено саме даною компанією, однак він не є незалежним від мови програмування.

В розробці мовно-незалежного інкрементного детектору основою якого і виступають деякі засади автоматизованого інструменту для виявлення дубльованого коду SIG. Алгоритм, за яким буде працювати запропонований МНІД базується на основі індексу повторів. Таким принцип добре висвітлений в роботі Хаммела [2]. Індекс клону в цьому випадку є основною структурою даних. Представляється такий індекс глобальною структурою даних і подібний до типового інвертованого індексу. Підхід Хаммела, хоч і має в використанні лексичний аналізатор, що дозволяє перетворити вихідний код в токени, але він найбільш наближений до інкрементного підходу незалежного від мови детектора. Принцип роботи МНІДП висвітлений в статті [3]. В роботі [4] представлено вдосконалені мовно-незалежного інкрементного детектора шляхом застосування локально-чутливого хешування та експерименти, які проводилися для п'яти проектів (а саме, Rippled, Kooboo, Tensorflow, Openjdk-jdk14u, Linux Kernel) з метою виявлення блоків з повторами та надлишковістю.

При дослідженні роботи МНІДП постає необхідність проведення експериментів, які зможуть відповісти на питання оцінювання продуктивності розробленого детектору та порівнянні його з підходом комерційного рівня SIG по виявленню клонів, для вивчення переваг, які може запропонувати інкрементний підхід.

Види експериментів

При експериментах розроблено для дві реалізації детектора виявлення повторів і надлишковості в програмному коді з потрібними функціями. Далі вимагається проведення кількісних експериментів для конкретних випадків.

Оцінка МНІДП

На питання, як діє підхід МНІДП, для початку треба визначити, принцип роботи запропонованого детектора, який було отримано в наслідок корегування підходу представленого Хаммелом [2]. Щоб отримати представлення про продуктивність МНІДП, його запускають для п'яти програмних систем (які зазначені вище), проводячи вимірювання вимог до часу та пам'яті. Тобто для кожної системи відбувається аналіз серії з п'ятдесяти комітів та виміри часу і пам'яті, які будуть потрібні для процесу створення індексу. Також проходить вимірювання середнього часу, потрібного для обробки п'ятдесяти комітів під час кроків інкрементного процесу. Для спостереження за поведінкою МНІДП по відношенню до виявлених повторів та надлишковості у програмному коді, постає потреба у проведенні додаткових експериментів. Зокрема, відбувається аналіз десяти самих останніх комітів для кожної з систем, існуючих в наборі даних і виявлення тих повторів (клонів), які додавалися та знищувалися.

Оцінювання МНІДП проти SIG

В ході експериментів відбувається порівняння ефективності запропонованого у дослідженні підходу МНІДП та сучасного традиційного підходу SIG, для виявлення повторів та надлишковості в програмному коді. Остаточна мета – це перевірка покращення, яке має забезпечувати інкрементний підхід, в тому разі, коли процес виявлення повторюється регулярно для кожного нового перегляду програмного проекту.

Порівнювання виявляється непростю справою, оскільки детектор клонів SIG відрізняється від МНІДП в багатьох відношеннях. Конкретніше, процес виявлення повторів в програмному коді SIG відпрацьовує в межах SAT (інструмент, для запуску окрім виявлення клонів, ще великої кількості додаткових процесів). Тому з'являється потреба в ізолюванні процесу виявлення клонів та виміру його окремо від інших процесів. Крім цього, відбувається виведення всіх клонів в версії програмного

забезпечення через те, що детектор SIG не є інкрементним. Навпроти, МНІДП дає змогу виведення тільки нещодавно доданих або видалених блоків повторів (клонів) в визначеній версії системи. З цього випливає, що неможливо співставити напряму результати двох підходів, саме з точки зору виявлення повторів.

В даному дослідженні проводиться заміри і порівняння двох вищезгаданих підходів на основі часу, потрібного для процесу виявлення повторів та надлишковості в програмному коді. Зокрема, відбувається застосування детектору SIG для серії з півсотні комітів, заміри середнього часу, потрібного для обробки та порівняння результату з результатами індивідуальної оцінки МНІДП. Щодо виявлених кожним інструментом повторів (клонів коду) та надлишковості, та врахування описаної відмінності в вихідних даних кожного з підходів, на практиці відбувається перевірка на співпадіння клонів, виявлених цими детекторами. Однак, через те, що запропонований в дослідженні метод, та детектор SIG не являються ймовірнісними, заснованими на тексті методами (тобто необроблений вихідний код, не підлягає ніяким перетворенням, які можуть призвести до втрати інформації, що тягне за собою зниження точності та повноти), то можна очікувати співпадіння виявлених блоків повторень, виявлених обома підходами. Щодо пам'яті, то знову підходи виявляються неспівставними, через складність ізоляції процесу виявлення блоків повторів SIG та необхідності проведення вимірювання пам'яті тільки для цієї частини процесу.

Оцінка розширень, заснованих на ЛЧХ

Для відповіді на питання розширення та вдосконалення початкового підходу, шляхом використання ЛЧХ, виникає необхідність в вимірюванні продуктивності запропонованого розширення на базі ЛЧХ та порівнянні його з продуктивністю МНІДП. Так само, як і при оцінюванні мовно-незалежного інкрементного детектору повторів, досягається це виміром часу виконання та потреб в пам'яті запропонованого в дослідженні розширення на основі ЛЧХ. Порівнянні цих показників з відповідними результатами для підходу з використанням детектору МНІДП. Є можливість проведення індивідуального порівняння, оскільки обидва підходи являються інкрементними, та в їх основі полягає одна і та сама основна ідея. Відбувається порівняння метрик для кожного з двох процесів, процесу створення індексу та процесу інкрементного кроку.

Знову буде застосоване вище згадане експериментальне налаштування, де використані п'ять програмних систем і півсотні комітів для кожної з них. Важливо звернути увагу на те, що дослідження направлене лише на вивчення запропонованого розширення на базі ЛЧХ з точки зору ефективності. Тобто, запропонований метод може призвести до підвищення продуктивності в будь-якому з двох робочих процесів: створення індексу та інкрементного кроку.

Логічно було б провести вимір відгуку реалізації заснованої на ЛЧХ, оскільки цей метод за визначенням включає ймовірність пропуску блоків коду з повторами (клонів) та надлишковістю, але такі дослідження проводитися не будуть. Після того, як буде визначено спочатку, чи достатньо ефективною виявилася реалізація на основі ЛЧХ для покращення підходу МНІДП, тільки потім має сенс отримати висновки, які містили б корисну інформацію, про втрату клонів. Однак результатом нашого дослідження стає вивчення ефективності підходу, а відповідні емпіричні експерименти по втраті блоків коду з повторами та надлишковістю залишаються в якості майбутньої роботи.

Вхідна перевірка

Для перевірки результатів, які будуть отримані після застосування розроблених детекторів, виникає потреба в еталонному тесті для обраних програмних систем. Тобто, потрібно отримати оцінку того, чи являються отримані виявлені блоки з повторами та надлишковістю дійсними та повними, а саме, чи були виявлені всі доступні клони. Під час розробки запропонованого дослідження подібний набір перевірочних даних не був доступним. В зв'язку з цим перевірка результатів запропонованого підходу на основі МНІДП та ЛЧХ в контексті даного невеликого проекту відбувалася вручну. Було протестовано і перевірено декілька варіантів використання, які стосувалися знищення, оновлення, створення чи перейменування файлів. Вручну створено коміти для імітації оновлення реальної програмної системи. Звичайно, перевірка на повноту для детектора на основі ЛЧХ не проводилася, через характер даного методу. Зверніть увагу, хоча результат тестувався для невеликого проекту, очікується, що запропонований підхід буде відпрацьовувати так само і для великих кодових баз, якщо охоплюватимуться всі сценарії варіантів використання. Тести, які були проведені, відносяться до наступних варіантів використання:

1. *Додавання новостворених файлів.* Виконувалося тестування сценаріїв, в яких ці файли представляли один або декілька блоків з повторами (клонами) та надлишковістю, а інші сценарії, в яких дублювання не додавалося. У першому типі сценаріїв проводилася перевірка на правильність виявлення блоків з повторами та надлишковістю коду, тоді як в другому перевірялося, що клони не виводилися.
2. *Перейменування файлів.* Відбувалася перевірка, що блоки коду з повторами в перейменованих файлах були виявлені та зареєстровані з оновленим ім'ям файлу.
3. *Оновлення файлів.* Проводилося тестування декількох сценаріїв, в яких знищувалися та додавалися блоки коду в існуючі файли, перевіряючи виявлення знищених або доданих фрагментів програмного коду з повторами та надлишковістю.

4. *Знищення файлів.* Тестування стосувалося видалених файлів, в яких містилися блоки коду з повторами (клонами) та надлишковістю і підтвердження в цьому разі, що відбулося вірне виявлення видалених клонів.

Конфігурація інструментів.

Параметри конфігурації, які були використані в експериментах для реалізації детекторів клонів, заснованих на МНІДП та ЛЧХ, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Конфігурація реалізацій МНІДП та ЛЧХ

LIICD	LIICD LSH-based		
CHUNK SIZE	CHUNK SIZE	PERMUTATIONS	THRESHOLD
6	6	64	0.2

Параметр `CHUNK_SIZE` – це кількість рядків у кожному блоці коду, який підлягає хешуванню. Значення його було обрано рівним 6, що означає мінімальний розбір блоку програмного коду з повторами та надлишковістю, та вказує на ідентичну мінімальну довжину клону, яку SIG визначає за замовчуванням на даний час.

Параметр `PERMUTATIONS` – це кількість функцій, в запропонованій реалізації на основі ЛЧХ, які використовуються для процесу MinHashing. З точки зору порівняння подібності, значення цього параметра рівне 64, призводить до рівня помилок, розрахованих за формулою (1)

$$\text{error} = 1 / \sqrt{64} = 12,5\% \quad (1)$$

Тобто, коли відбувається ідентифікація двох файлів як подібних/не подібних, ймовірність того, що ця ідентифікація помилкова складає 12,5%.

Параметр `THRESHOLD` – поріг, який прирівнюється до 0,2, та перетворюється в 20%, вказуючи на самий низький поріг подібності, для якого визначається подібність двох файлів.

Інфраструктура

Для досягнення мети експериментів, при їх проведенні запускається дві категорії тестів на одній машині з налаштуванням апаратного забезпечення, представленого у таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики забезпечення

	Специфікація
Пам'ять	32 GB
Процесор	Intel Xeon E5-2650 v2 @2.6GHz

Інформаційний фонд

В ході проведення досліджень для різних реалізацій детекторів, було використано в якості вихідних даних п'ять проектів з відкритим вихідним кодом. Вибір відбувався таким чином, щоб була змога охопити відносно широкий спектр проектів, які мають різний розмір та написаних на різних мовах програмування. Конкретніше, відбувалося вимірювання розміру кожного проекту з точки зору LOCs (Lines Of Code), з застосуванням інструменту CLOC¹. Даний інструмент спроможний проводити підрахунок пустих рядків, рядків коментарів та фізичних рядків вихідного коду на багатьох мовах програмування. Вимірювання точної частки дублювання у вибраних системах неможливе, через характер запропонованих в дослідженні детекторів, спроможних виводити блоки коду з повторами (клони), які були додані або видалені в певній версії, замість того, щоб виводити всі клони і цієї версії. Однак, спираючись на статистичні дані, які отримані з аналізу, проведеного в рамках SIG 192 програмних систем, виявилось, що середнє дублювання коду складає приблизно 13%, при стандартному $\pm 12\%$. В даному розділі роботи представлено процес вимірювання LOCs для кожної системи, а також процес фільтрації вихідних частин.

Початкова колекція інформаційного фонду

Завдяки вимірюванню великої кількості проектів з відкритим кодом, для створення колекції початкового інформаційного фонду, було обрано п'ять з них. При цьому їх LOCs коливаються в діапазоні приблизно від 300 000 до 23 000 000 рядків коду. На рис. 1 представлено лістинг, де вказані параметри конфігурації CLOC, які було використано на цьому етапі.

```
1 $ cloc --skip-uniqueness {target_project}
```

Рис. 1. Початкова конфігурація CLOC

¹ Інструмент доступний на Github: <https://github.com/AIDanial/cloc>

Обрані проекти зведені в таблицю 3, де також вказана мова програмування, загальна кількість файлів, та кількість рядків в програмному коді LOCs.

Причиною обрання програмних систем з LOCs нижче описаного діапазону являється те, що справжні переваги інкрементного підходу стають видимими лише для проектів з відносно великою кількістю рядків в програмному коді, коли повторне виявлення з використанням традиційних підходів стає доволі повільним.

Обране об'єднання програмних проектів, як видно з таблиці, охоплює широкий спектр мов програмування та кількості (LOCs) рядків. Надані значення у стовпці «Кількість стовпців LOCs» – є результатом додавання, що відповідає коментарям, і тих, які посилаються на фактичне джерело коду. До уваги не приймаються пусті рядки, оскільки їх буде знищено на етапі попередньої обробки кожного детектору.

Таблиця 3

Початковий інформаційний фонд проектів з відкритим кодом

	Мова програмування	Кількість файлів	Кількість LOCs
Linux Kernel	C	57.205	23.229.768
Openjdk-14	Java	60.444	12.045.316
Tensorflow	C++, Python	12.387	3.194.893
Kooboo	C#, JS, HTML, CSS	4.109	670.265
Ripple	C / C++	1.399	312.011

Фільтрація виконуваного коду

Для вимірювання різних показників ремонтпридатності, включаючи виявлення повторів та надлишковості у програмному коді SIG використовує такий інструмент, як SAT. За допомогою нього також є можливість виконання відповідного аналізу тільки тих частин кодової бази, що позначені як виконуваний код.

Ігнорування відбувається і коду, поміченого, як тестовий код, разом із іншими незначними файлами, такими як README.md або файли журналів. Після обробки SAT тільки частини всієї кодової бази, в результаті, що логічно, іде зменшення кількості LOCs, які піддаються обробці. Для об'єктивного порівняння детектора SAT та запропонованої в дослідженні реалізації, треба враховувати і таке зниження. Тому знову доведеться використовувати CLOC для оцінки LOCs для кожного проекту, включаючи цього разу неревалентні каталоги. Точна конфігурація представлена в лістингу на рис. 2. Нові вимірювання для вищезгаданих проектів подані в таблиці 4.

```
1 $ cloc --skip-uniqueness --exclude-dir=test,tests,doc,examples,licences
,lib --not-match-f=^.*test.*$ {target_project}
```

Рис. 2. Конфігурація фільтрації CLOC

Таблиця 4

Відфільтрований інформаційний фонд проектів з відкритим кодом

	Мова програмування	Кількість файлів	Кількість LOCs
Linux Kernel	C	56.270	22.963.637
Openjdk-14	Java	23.905	7.498.482
Tensorflow	C++, Python	8.610	2.120.650
Kooboo	C#, JS, HTML, CSS	4.064	668.055
Ripple	C / C++	1.073	207.166

Фільтрація невірних файлів

Програмні проекти, в тому числі ті, які обрані в нашому інформаційному фонді, зазвичай складаються з ряду файлів у двійковому форматі. Обробка подібних файлів для виявлення, в потрібному контексті, блоків з повторами та надлишковістю позбавлена сенсу, оскільки не можна отримати цінної інформації. Отже при проведенні обробки кожного відповідного проекту, додатково будуть виключені двійкові байти та файли з неюнікодовими символами в обох реалізаціях МНІДП та ЛЧХ. В додатку Б представлено список з вказуванням усіх розширень файлів, які піддавалися фільтрації. Увага звертається на те, що, оскільки подібні файли утворює лише невелика частина всієї кодової бази, то видалення таких файлів, як і очікується, лише незначно вплине на кількість рядків (LOC) у коді, які згадуються у попередніх розділах.

Моделювання комітів

Постає необхідність моделювання процесу відправки комітів в репозиторій управління версіями, де буде розміщено проект, який підлягає аналізу. Це забезпечуватиме спостереження та вимірювання того, як працюють детектори під час покрокового робочого процесу. Таке моделювання відбувалося з

використанням файлів конфігурації JSON. Подібні файли складаються за списків комітів, які піддаються аналізу, а також змін (створення, оновлення, знищення, перейменування), які кожний з цих комітів вносить.

В контексті експериментів, при проведенні досліджень в ході роботи, для кожного з програмних проєктів відбувається аналіз п'ятдесяти останніх комітів, виключаючи злиття, та вимірюються показники, які відповідають кожній з описаних категорій експериментів. Самий останній коміт для кожного програмного проєкту, показує снєшот (знімок файлової системи – копія файлів та каталогів файлової системи на даний момент часу), використаний під час аналізу та представлений в Додатку А. Оскільки детектори за визначенням виключають деякі з цих півсотні комітів, які можуть складатися із змінених файлів, то існує ймовірність обробки менше ніж п'ятдесяти. Наприклад, коміт буде пропускатися, якщо він включатиме лише модифікації тестових файлів (які пропускаються детекторами), то зрештою ніякі файли не оброблятимуться.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені в дослідженні експерименти надали деяку корисну інформацію на основі оцінки ефективності запропонованого розширення на основі ЛЧХ. Конкретніше, в деяких випадках у порівнянні з реалізацією МНІДП, етап створення індексу в підході на основі ЛЧХ виявився в два, а в деяких випадках в три рази повільнішим. Можливою причиною, яка призводить до цього може бути складність операції MinHash, яка складає значну частину загальної схеми ЛЧХ. Це стає очевидним, якщо враховувати, що хешування кожної черепиці для кожного набору черепиць під час MinHashing має проводитися обумовленими к хеш-функціями. Навпаки, з точки зору використання пам'яті, що призвело до скорочення у п'ять разів для випадку Linux, ЛЧХ виявився набагато ефективнішим. Однак, тільки це не являється виправданням для використання даного підходу замість МНІДП. Вимірювання інкрементного кроку, крім цього, не відповідало нашим первинним очікуванням. Передбачалося, що процес інкрементного кроку реалізації на основі у порівнянні з МНІДП буде значно повільнішим, через обчислення записів індексу на льоту. Однак в ході проведеного дослідження було отримано протилежні результати. Практично, це виправдовувалося тим, що використаний поріг подібності не став причиною виявлення великої кількості збігів між вихідними файлами. Для отримання кращого розуміння його поведінки виникає необхідність проведення подальших досліджень зв'язку часу виконання, потрібного для потоку інкрементного кроку реалізації на основі ЛЧХ та порогу подібності.

Література

1. Stefan Bellon, Rainer Koschke, Giulio Antoniol, Jens Krinke, and Ettore Merlo. Comparison and evaluation of clone detection tools. *IEEE Transactions on software engineering*, 33(9):577–591, 2007.
2. Benjamin Hummel, Elmar Juergens, Lars Heinemann, and Michael Conradt. Indexbased code clone detection: incremental, distributed, scalable. In *2010 IEEE International Conference on Software Maintenance*, pages 1–9. IEEE, 2010.
3. Праворська Н.І., Бармак О.В., Медзатий Д.М., Шестакевич Т.В. Процес виявлення блоків з повторами і надлишковістю при використанні мовно-незалежного інкрементного детектору. *Вісник Хмельницького національного університету, серія Технічні науки*, № 3, 2021, С. 39–45.
4. Праворська Н.І., Бедратюк Л.П., Форкун Ю.В. Яшина О.М. Мовнонезалежний детектор для виявлення і усунення повторів та надлишковостей програмного коду. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький*, 2021. № 1, С. 56–61.

References

1. Stefan Bellon, Rainer Koschke, Giulio Antoniol, Jens Krinke, and Ettore Merlo. Comparison and evaluation of clone detection tools. *IEEE Transactions on software engineering*, 33(9):577–591, 2007.
2. Benjamin Hummel, Elmar Juergens, Lars Heinemann, and Michael Conradt. Indexbased code clone detection: incremental, distributed, scalable. In *2010 IEEE International Conference on Software Maintenance*, pages 1–9. IEEE, 2010.
3. Pravorska N.I., Barmak O.V., Medzaty D.M., Shestakevych T.V. Protsey vyivlennia blokiv z povtoramy i nadlyshkovistiu pry vykorystanni movno-nezaleznoho inkrementnoho detektoru. *Herald of Khmelnytskyi National University, seria Tekhnichni nauky*, № 3, 2021, s. 39–45.
4. Pravorska N.I., Bedratiuk L.P., Forkun Yu.V. Yashyna O.M. Movnonezalezhnyi detektor dlia vyivlennia i usunennia povtoriv ta nadlyshkovostei prohrannoho kodu. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. Khmelnytskyi*, 2021. № 1, s. 56–61.

ШАХОВСЬКА Н. Б.

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6875-8534>e-mail: Nataliya.b.shakhovska@lpnu.ua

ШЕБЕКО А.

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-0212-8855>e-mail: andrii.shebeko.knm.2018@lpnu.ua

РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ З ФОТОГРАФІЙ ДОКУМЕНТІВ

Робота спрямована на створення інформаційної системи оптичного розпізнавання символів з фотографій документів. Складність опрацювання зображень, які являють собою набір пікселів, викликають у комп'ютерів незручності у роботі з такими даними. Для розв'язання цієї задачі можна використати такі підходи: математичні алгоритми, одна складна нейронна мережа або набір з кількох простих нейронних мереж. Звичайні математичні алгоритми складно оптимізувати до необхідної точності при використанні неструктурованого набору даних, яким являються зображення. Одна складна нейронна мережа є як швейцарський ніж, який може усе, але недостатньо якісно. Саме тому ми будемо використовувати 2 типи нейронних мереж з різними архітектурами, кожна з яких спрямована на розв'язання конкретної підзадачі. Ключовими елементами такої технології є: модуль пошуку тексту, модуль розпізнавання символів української та англійської мови, модуль пошуку ключових слів, модуль пошуку необхідних даних.

Ключові слова: оптичне розпізнавання символів, рекурентні нейронні мережі, аналіз зображення.

Nataliya SHAKHOVSKA, Andrii SHEBEKO

Lviv Polytechnic National University

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF DOCUMENT OPTICAL CHARACTER RECOGNITION SYSTEM

This paper aims to develop information technology for document optical character recognition systems. The difficulty of processing images, which are a set of pixels, causes inconvenience in working with such data. This problem can be solved in different ways: usual mathematical approaches, a single complicated neural network, and a set of problem-specific deep neural networks. Usual mathematical approaches perform poor with unstructured data like images. A single neural network is like a swiss knife: it can do many tasks, but none with the best quality. So we will use two different deep neural networks, each for the appropriate part of the problem.

The critical elements of this technology are the module for text detection and segmentation of the image, the module for text recognition in Ukrainian and English languages, the module for parsing multiple keywords, and the module for searching for the final data. The first and second modules consist of several machine learning models with specific architecture, depending on their task. All trained models are tested for accuracy and noise resistance and will be used in the future for searching required data from different document images. Output data of the developed system provide speedup, automation processing images and scans of the documents, reduce the number of mistakes caused by human factor. All data is converted from image pixels into a structured text set represented in the document, which the machine can easily use.

We can use such technology in banking and insurance, where we can send images of documents and they will be automatically processed and converted into user name, surname, date of birth, serial number, and required fields for specific services.

Keywords: optical character recognition, recurrent neural networks, image analysis.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В даний час технологія ідентифікації по паспорту, водійському посвідченню, студентському квитку відіграє дуже важливу роль у нашому суспільстві. Ця технологія використовується при наданні адміністративних послуг, банківській сфері та ін. В минулому дані документу вводилися вручну, що вимагає уважності та певних затрат часу. Питання щодо швидкого та точного отримання інформації з документів стало важливим завданням для науковців та бізнесу.

Автоматична ідентифікація по документах має дуже високу дослідницьку перспективу та значне практичне застосування. Ідентифікація по зображенню документів є задачею обробки зображень, яке зазвичай складається з трьох основних частин: попередня обробка зображення, сегментація зображення та розпізнавання символів. Прикладами використання даної технології є: актуалізація даних в Приват банку, студентська підписка на Ютуб а також ідентифікація на біржі Бінанс.

Незважаючи на широке застосування даної технології, існує багато нюансів, які є досі у процесі удосконалення. Прикладом може бути зчитування зашумленого тексту з зображення. Результатом статистичного дослідження виявлено, що людина, наприклад, при пошуку втручання у зображення, людина знаходить їх у 53% випадків, у той час як нейронні мережі правильно розпізнають близько 99% інформації з зображень [10].

Удосконалення нюансів даної технології може стати важливою як для бізнесу так і для держави. Наприклад, це може дозволити людині легше та швидше отримувати певні переваги, які надають онлайн сервіси ідентифікованим користувачам. А для бізнесу це є більший ступінь захисту інтересів як власних так і користувача [3, 11]. Сфера бізнесу потребує сучасних інформаційних технологій для автоматизації

процесів, покращення продаж, збільшення привабливості та зменшення собівартості продукту. Сучасні мобільні персональні пристрої надають змогу оформити страхування чи іншу необхідну послугу незалежно від місця та часу. А автоматизація обробки даних дозволяє задовільнити потребу користувача в з найменшими затратами часу та людських ресурсів.

Аналіз досліджень та публікацій

З розвитком технологій виникає все більша потреба у швидкій та якісній автоматичній обробці даних. Для роботи з таблицями, текстовими або числовими файлами створено безліч систем опрацювання, перевірки, редагування та їх автоматичної генерації з мінімальним втручанням людини. З таким типом даних комп'ютерні системи справляються без проблем та значно швидше та ефективніше за людину. Зовсім по іншому склалась ситуація з обробкою фото та відео. Існує безліч книг, архівів, чеків та звітів у паперовому вигляді, які необхідно оцифрувати, або відеофайли з камер дорожнього руху, на яких необхідно виявити та зчитати номери машин. Ці всі проблеми відносяться до однієї категорії – комп'ютерного зору. А пошук розпізнавання тексту, номерів машин – до оптичного розпізнавання символів.

Ми розглянемо проблему зчитування тексту з фотографій документів з фіксованою структурою: паспорт, водійське посвідчення, студентський квиток. У практичних застосунках, зчитування тексту з зображень ускладнюється розмитістю тексту, складним та неоднорідним фоном, викривленням перспективи. Саме тому у більшості втілень система поділяється на декілька модулів, перший – це попередня обробка, наступний це виділення області де знаходиться текст і останній це розпізнавання самого тексту [1–4]. Також варто зазначити, що дана проблема є значно складнішою чим наприклад розпізнавання номерних знаків, де використовуються однотипні камери з високою роздільною здатністю та статичним фоном [9]. У нашому випадку знімок може бути зроблений з безлічі моделей телефонів, з різних ракурсів, освітленості та ін. [3].

Розглянемо перший етап – попередню обробку, яка полягає у зменшенні кількості шумів, вирівнювання контрасту, яскравості, іноді приведення до відтінків сірого, для збільшення швидкодії наступних кроків алгоритму [1, 3]. Деякі підходи передбачають приведення зображення до бінарного вигляду, наприклад за допомогою алгоритму OSTU [1], вихідне зображення містить два класи пікселів, наступної бі-модальної гістограми: пікселі переднього плану і пікселі тла, потім обчислюється оптимальний поріг, що розділяє два ці класи. Для зменшення шуму застосовується фільтр Гауса з малим (3, 5) розміром ядра [3]. Для ще більш чіткого виділення тексту на зображеннях застосовується оператор Собеля у вертикальному та горизонтальному напрямках, який дає змогу виділити границі, контури. В деяких рішеннях замість оператора Собеля використовують алгоритм Кенні. Оскільки сам документ може являти не 100% площі зображення, виконують пошук границь, далі пошук кутів прямокутника, який описує сам документ а далі відкидають весь непотрібний фон та проводять вирівнювання перспективи [4].

Відповідно до нашого підходу – ми використовуємо окремі нейронні мережі для пошуку та для розпізнавання тексту. Отже після попередньої обробки зображення необхідно знайти сам текст. До широкого розповсюдження нейронних мереж використовувались висхідні підходи: MSER, SWT [4]. Далі набули розповсюдження моделі пошуку об'єктів або сегментації: SSD, R-CNN, FCN [5]. Для пошуку тексту на зображенні ми розглянули 2 новітні підходи з використанням нейронних мереж. Перший – це пошук цілого слова, проте дані підходи показують значне зниження ефективності у складних ситуаціях: текст викривлений, спотворений, зашумлений або надзвичайно довгий і об'єднати текст в 1 обмежувальну коробку стає складно [5]. На противагу, існує підхід з пошуком окремих літер, який їх потім об'єднує в слова та речення. Пошук по окремих літерах усуває складності, які виникають при пошуку зразу цілого слова, саме тому цей підхід ми і обрали. Алгоритм CRAFT – Character Region Awareness for Text Detection (розпізнавання регіону символів для виявлення тексту) полягає у використанні згорткової нейронної мережі яка генерує оцінку регіонів символів та оцінку спорідненості (Affinity score). Оцінка регіонів дозволяє локалізувати окремі символи на зображенні, а оцінка спорідненості використовується для об'єднання символів у групи, які в подальшому об'єднуються в рядки та стовбці, для подальшої обробки [5].

Отримані області з текстом являють собою прямокутники пікселів, які є досі незрозумілими для більшості комп'ютерних систем. Їх необхідно перетворити у текст. При роботі з нейронними мережами ми зазвичай представляємо дані у вигляді векторів. І вихідні дані у нашій задачі являють собою набір символів, які складаються в слова. Отже, ми маємо справу перетворенням послідовності пікселів у послідовність символів (sequence to sequence). Тобто ми з одного зображення на вході, повинні отримати декілька послідовних передбачень. Довжина залежить від слова, наприклад в англійській мові від двох літер (ok) до п'ятнадцяти (congratulations) і більше. Через таку варіативність, звичайні глибокі згорткові нейронні мережі (DCNN) не можуть бути напряму використані для розв'язання таких задач [6]. Для роботи з послідовностями використовують рекурентні нейронні мережі (RNN), які не вимагають чіткої відповідності між вхідними та вихідними даними [6]. З цього випливає, що ми можемо поєднати переваги кожного з підходів, використавши елементи глибокої згорткової та рекурентної нейронної мережі (CRNN). Перевагами даного підходу є: можливість на пряму отримувати та навчатись інформативних ознак безпосередньо з вхідних зображень, завдяки DCNN на вході, має таку ж властивість, як і RNN, здатні створювати послідовність передбачень, відсутність обмеження по довжині послідовних об'єктів, вимагаючи лише

нормалізації по висоті як при тренуванні, так і при використанні, а також містить меншу кількість параметрів мережі, та відповідно менший час обробки даних чим звичайні глибокі нейронні мережі [6].

Після отримання текстового представлення того, що зображено на фотографії, необхідно знайти необхідні дані. У нашому випадку це поля з ім'ям, прізвищем та ін. Проаналізувавши структуру документів, з якими необхідно працювати, можна прийти до висновку, що розташування даних нагадує таблицю. Найсучаснішим підходом є CascadeTabNet, яка використовується для виявлення кінцевої таблиці та розпізнавання структури з документів на основі зображень. Вона використовується при оцифровуванні фотографій таблиць та певних документів, в основі алгоритму – каскадна нейронна мережа. Даний підхід є надзвичайно ефективним [7], особливо для великих наборів даних. Проаналізувавши рішення даної проблеми, ми можемо значно спростити структуру алгоритму пошуку до двох етапів: пошуку ключових слів, завдяки порівнянню відстані Левенштейна [8]. А також, маючи координати ключового слова – можна здійснити пошук відповідного значення у 2-вимірному просторі, знаючи про розташування шуканого слова відносно ключового [2].

Отже, проаналізувавши та обравши найбільш відповідні існуючі рішення, визначено мету роботи – побудувати систему оптичного розпізнавання символів з фотографій документів. Ключовими елементами такої технології повинні бути: модуль попередньої обробки, модуль пошуку тексту, модуль розпізнавання тексту, модуль пошуку ключових слів, модуль пошуку необхідних слів.

Виклад основного матеріалу

З опрацьованих джерел ми можемо виділити ключові блоки, необхідні для реалізації нашого алгоритму розпізнавання тексту з фотографій документів. Для більшої гнучкості та спрощення реалізації покращень кожен блок є незалежним, і при необхідності його можна покращити або замінити на більш ефективну або нову реалізацію конкретної підзадачі. Також для зручності використання, алгоритм обгорнуто у сервер з кількома точками доступу, який можна розгорнути на окремій робочій станції та за необхідності надсилати фотографії на обробку та отримувати результати обробки як тільки вони готові, або за запитом, а також зберігати усі дані для подальшого використання та аналізу.

Отже ми отримуємо таку архітектуру:

- Ініціалізація та завантаження моделей у пам'ять відеокарти для пришвидшення обробки зображень за допомогою технологій CUDA, cuDNN та розпаралелювання даних. Викликається один раз, при запуску сервера або алгоритму.
- Попередня обробка зображення – приведення зображення до відтінків сірого, застосування фільтра Гауса з розміром ядра 3*3 для зменшення шумів, також є можливість змінювати розмір зображення – зменшити для пришвидшення роботи, або збільшити – для покращення результатів.
- Пошук тексту на зображенні, за допомогою попередньо натренованої моделі CRAFT, яка повертає нам набір областей з текстом, які представляються координатами точок прямокутника, який описує даний текст. Приклад роботи пошуку зображено на Рис. 1.
- Розпізнавання тексту на зображенні. Даний модуль складається з двох окремих модулів: розпізнавання англійських літер та символів за допомогою попередньо натренованої нейронної мережі CRNN, яка у свою чергу представляє архітектуру VGG-BiLSTM-CTC та розпізнавання українських літер та символів за допомогою власноруч натренованої нейронної мережі CRNN, яка у свою чергу представляє архітектуру ResNet-BiLSTM-CTC. Приклад роботи зображено на Рис. 1.

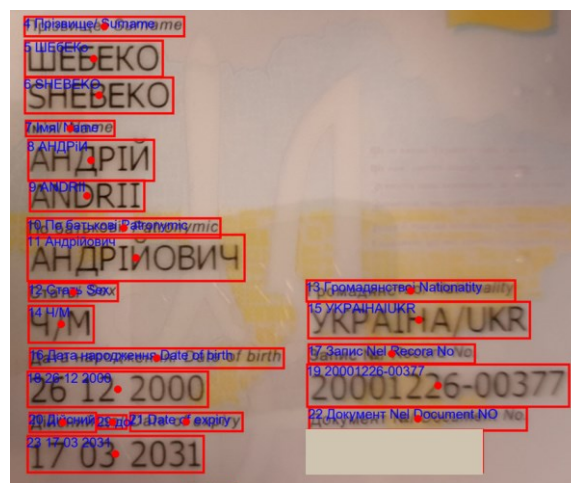


Рис. 1. Елемент документу. Приклад роботи модулів пошуку тексту (червоні рамки) та розпізнавання тексту (синій текст)

- Визначення найкращих співпадінь, пошук ключових слів – маючи набір ключових слів, характерний для певного документу (наприклад 'орган, що видав' – для паспорта або 'категорія' – для водійського посвідчення) ми можемо провести порівняння з усіма словами, які розпізнали нейронні мережі на попередньому кроці. І за допомогою обчислення відстані Левенштейна обрати найкращі співпадіння, які і

будуть нашими ключовими словами для відповідної мови, оскільки вони дублюються обома мовами (Рис. 2).

- Пошук відповідних до ключових слів даних – маючи координати ключових слів, ми у 2 вимірному просторі можемо провести пошук відповідних даних (наприклад під ключовим словом ‘Прізвище’ знаходиться прізвище власника документа, або справа від ‘Категорія’ знаходиться літера, яка позначає категорію водія транспортного засобу).

```
Surname != surname
Levenshtein distance
Surname | surname = 71
Surname | date = 36
```

Рис. 2. Приклад застосування відстані Левенштейна для порівняння слів/рядків

Для наочного представлення, усі основні компоненти зображено діаграмі діяльності (Рис. 3).

Функціональні вимоги

Система повинна бути простою у використанні та інтеграції у існуючі застосунки, або при розгортанні на окремій машині. Для цього ми проаналізували застосунок, та виокремили основні елементи, до яких будуть відбуватись виклики ззовні. Це ініціалізація системи та завантаження моделей у пам'ять відеокарти, завантаження та обробка зображень та отримання готових результатів. Ці три елементи були виділені у окремі блоки та обгорнуті у інтерфейси веб-серверу на основі FastAPI, яка дає змогу розгорнути та запустити легкий та гнучкий сервер.

Наш сервер реалізує доступ до наступних функцій алгоритму:

- Ініціалізація та завантаження моделей в пам'ять відеокарти – при виконанні запиту, з пам'яті комп'ютера зчитується нейронна мережа, усі необхідні алгоритми з бібліотеки cuDNN, відбувається виділення пам'яті відеокарти та туди завантажуються усі необхідні для роботи дані.

- Отримання вхідних даних – надсилання зображення або групи зображень з мітками про тип документа, які будуть автоматично опрацьовані та збережені на сервері.

- Збереження даних та передача – отримання готових опрацьованих даних з вхідних зображень.

Оскільки система розглядається як компонент для обробки даних – необхідності у витрачанні ресурсів на авторизацію та роботу зі складною базою даних немає. Через відсутність авторизації необхідно розгорнути сервер лише у захищеній віртуальній приватній мережі (VPN). А база даних являє собою одну таблицю з двома полями: назва вхідного зображення та результати обробки даного зображення. Для подальшої розробки та аналізу присутня система логування, яка записує усі події у системі, можливі помилки з детальною інформацією про них, а також час виконання кроку алгоритму та задіяні ресурси процесора, відеокарти, оперативної пам'яті. При майбутніх покращеннях, це надає змогу порівняти зміни у якості роботи, стабільності та швидкодії та акцентувати подальшу розробку на найбільш критичних для бізнесу елементах.

Серверна частина була розроблена за допомогою фреймворку FastAPI, який використовує технологію Uvicorn – імплементація веб серверу з інтерфейсом асинхронного серверного шлюзу (ASGI) та за допомогою мови програмування Python. Запити до серверу дотримувалися протоколу HTTPS та були оформлені згідно зі стандартом REST. Вибір фреймворку зумовлений його швидкістю, мінімальними затратами часу на інтеграцію, стандартизацією, яка чітко дотримується специфікацій побудови веб-інтерфейсів [fastapi web site].

На даний момент система підтримує три типи вхідних документів: паспорт, водійське посвідчення та студентський квиток. Під час запиту до сервера, разом з зображенням необхідно передати ключове слово з назвою документа. Необхідність в цьому полягає у тому, що кожен документ має різну структуру та ключові слова. Завдяки модульності системи обробка усіх типів документів відбувається однаково, крім

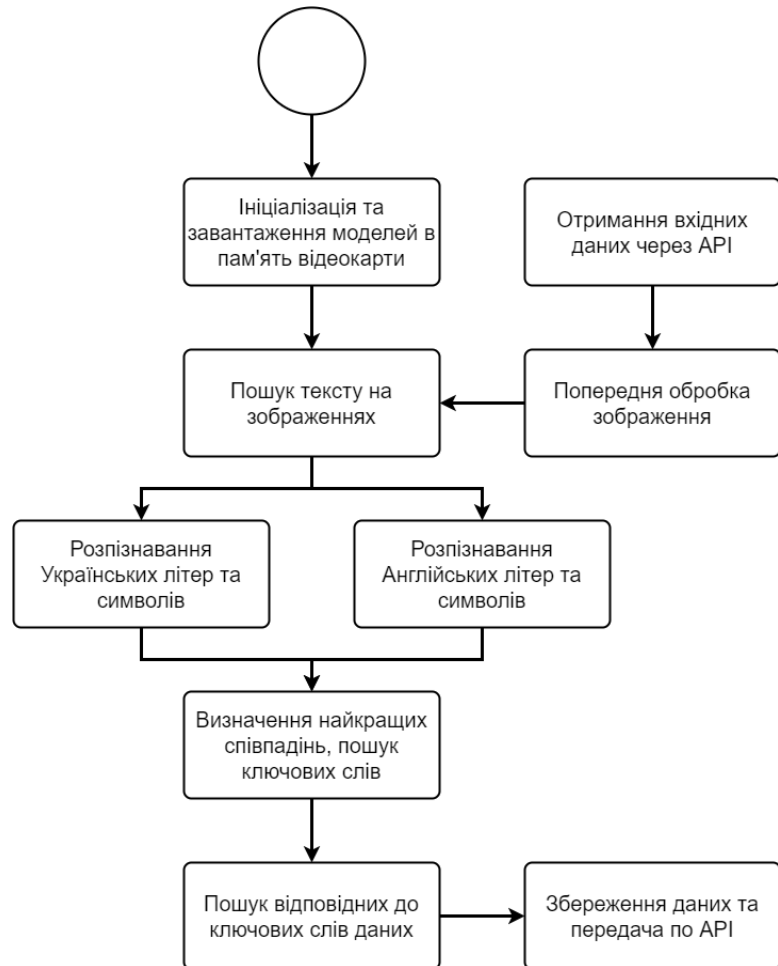


Рис. 3. Діаграма діяльності

етапу пошуку ключових слів. З цього випливає простота розширення системи – нам необхідно лише проаналізувати структуру нового документу та внести зміни лише в один модуль, додавши дані про ключові слова, відповідні до даного документу.

При використанні системи у прикладних застосунках є змога отримати великі об'єми інформації про якість роботи системи. Знаючи нюанси та неточності, які пов'язані з певним типом документу, ми можемо передавати серверу додаткові необов'язкові параметри для корегування алгоритму обробки. Наприклад при великій кількості шумів – ми можемо передати параметр для збільшення розміру фільтру Гауса, або при малому розширенні зображення – збільшити параметр масштабування, а при оптимальній якості обробки даних, але недостатній швидкодії – навпаки зменшити параметр масштабування.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблено архітектуру інформаційної технології оптичного розпізнавання символів з фотографій документів. Передбачено модульність алгоритму для спрощення розробки покращень, інтеграцію веб-інтерфейсу для зручності використання з уже існуючими системами та можливості розгортання на окремому сервері. Також наявна підтримка аналізу кількох видів документів, з можливістю додавання нових, без лишніх затрат часу, завдяки модульній структурі.

Система для оптичного розпізнавання символів з фотографій документів може бути використана для мобільних застосунків, таких як банківські, страхові, фінансові. Також можна розгорнути окремий веб-сервіс, до якого клієнти будуть відправляти зображення та отримувати готові результати з оцифрованими текстовими полями відповідно до документу.

References

1. Fang, Xuwei, Xiaowei Fu, i Xin Xu. 2017. «ID card identification system based on image recognition». C. 1488–92 в 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).
2. Nguyen, Tận, i Trong Khanh Nguyen. 2019. «A Method for Segmentation of Vietnamese Identification Card Text Fields». International Journal of Advanced Computer Science and Applications 10:415–21.
3. Zuo, Lin, Wenyu Chen, Hong Qu, Li Huang, Zheng Wang, i Yong Chen. 2019. «An Intelligent Knowledge Extraction Framework for Recognizing Identification Information From Real-World ID Card Images». IEEE Access 7:165448–57. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929816.
4. Dat, T. T., L. T. A. Dang, N. N. Truong, P. C. L. T. Vu, V. N. T. Sang, P. T. Vuong, i P. T. Bao. 2021. «An Improved Crnn for Vietnamese Identity Card Information Recognition». Computer Systems Science and Engineering 40(2):539–55. doi: 10.32604/CSSE.2022.019064.
5. Baek, Youngmin, Bado Lee, Dongyoon Han, Sangdoo Yun, i Hwalsuk Lee. 2019. «Character Region Awareness for Text Detection». P. 9357–66 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Long Beach, CA, USA: IEEE.
6. Shi, Baoguang, Xiang Bai, i Cong Yao. 2015. «An End-to-End Trainable Neural Network for Image-based Sequence Recognition and Its Application to Scene Text Recognition». arXiv:1507.05717 [cs].
7. Prasad, Devashish, Ayan Gadpal, Kshitij Kapadni, Manish Visave, i Kavita Sultanpure. 2020. «CascadeTabNet: An Approach for End to End Table Detection and Structure Recognition from Image-Based Documents». C. 2439–47 в 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Seattle, WA, USA: IEEE.
8. Navarro, Gonzalo. 2001. «A guided tour to approximate string matching». ACM Computing Surveys 33(1):31–88. doi: 10.1145/375360.375365.
9. Huang, Q., Z. Cai, i T. Lan. 2021. «A Single Neural Network for Mixed Style License Plate Detection and Recognition». IEEE Access 9:21777–85. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3055243.
10. Adobe Communications. «Adobe Research and UC Berkeley: Detecting Facial Manipulations in Adobe Photoshop». 2022 (<https://business.adobe.com/blog/the-latest/adobe-research-and-uc-berkeley-detecting-facial-manipulations-in-adobe-photoshop>).
11. Lin, G. S., J. C. Tu, i J. Y. Lin. 2021. «Keyword Detection Based on Retinanet and Transfer Learning for Personal Information Protection in Document Images». Applied Sciences (Switzerland) 11(20). doi: 10.3390/app11209528.

МЕЛЬНИКОВА Н. І.

Національний університет "Львівська Політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-2114-3436>e-mail: melnykovanatalia@gmail.com

ПОБЕРЕЙКО П. Б.

Національний університет "Львівська Політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-8884-1255>e-mail: pobereyko.petro26@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОШУКУ КЛЮЧОВИХ КАДРІВ У ВІДЕОПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ СИСТЕМ ПОШУКУ

У роботі викладено порівняльний аналіз сучасних досліджень в області аналізу відеоконтенту і на його основі встановлено, що ефективними методами аналізу цих даних є методи визначення ключових кадрів у відеопотоці. Особливо цінними є методи порівняння та пошуку збігів кадрів (фрагментів), а саме: методи пошуку послідовностей (виявлення об'єктів чи певних дій на кадрах); методи класифікації (визначення вмісту кадрів та розподілення їх до певних категорій); методи декодування кадрів (опис характеристик конкретного зображення) та методи виявлення аномалій у відеопотоці (пошук об'єктів, символів, які є унікальними властивостями фрагмента відносно інших). Особливо перспективними є методи засновані на технологіях машинного навчання, реалізація яких полягає у моделюванні тимчасових залежностей змінного діапазону з використанням загорткових нейронних мереж та функцій із спеціальними механізмами "уваги". Показано, що саме розвиток цих методів сприяє стрімкому розвитку інформаційних систем, за допомогою яких можна успішно здійснити аналіз відеоконтенту та розпізнати його оригінал.

Ключові слова: ключові кадри, нейронні мережі, навчання без вчителя, міра подібності

Nataliia MELNYKOVA, Petro POBEREIKO

Lviv Polytechnic National University

RESEARCH OF METHODS OF SEARCHING KEY FRAMES IN VIDEO FLOW WITH THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR SEARCH SYSTEMS

The paper presents a comparative analysis of current research in the field of data analysis in the format of video content and regarding it, that effective methods of analysis of these data are methods of search keyframes in the video stream. The analysis shows that the application of a method of processing visual data is determined by the structure of this data. Therefore, in order to simplify their analysis, they were divided into the following categories: consistent comparison; global comparison, based on clustering, and those that use events or objects. Especially valuable are the methods of comparing and matching matches (fragments), namely: methods of sequence search (detection of objects or certain actions on frames); methods of classifications (determining the content of personnel and their distribution to certain categories); frame decoding methods (description of the characteristics of a particular image) and methods for detecting anomalies in the video stream (search for objects, characters that are unique properties of the fragment relative to others). It shows that the most optimal of the considered methods there are methods that are based on technologies of artificial intelligence and machine learning. And also shows the difference and efficiency of deep learning methods in relation to conventional methods. Particularly promising are the methods, the implementation of which is to model the temporal dependences of the variable range using convolutional neural networks and functions with special attention mechanisms. Methods that use an Actor-Critic model embedded in a Generative adversarial network have also demonstrated their effectiveness. It is shown that the development of these methods contributes to the rapid development of information systems with which you can successfully analyze video content and recognize its origin.

Keywords: keyframes, neural network, unsupervised learning, similarity measure, generative adversarial networks

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зі стрімким розвитком Інтернету та сучасних технологій Інтернет мережі зображення та відео стали одним із найефективніших способів передачі даних. Це зумовлено тим, що людський мозок обробляє цю інформацію значно краще, ніж текстовий контент, наприклад, середньо статистична людина сприймає приблизно 80 % інформації через зір, а у випадку читання – лише 20 %. Тому знаходження важливої інформації у великих за обсягом текстах потребує значних затрат часу. Відео контент покликаний швидко та ефективно донести до людей те, що вони не бачать у текстових контентах. Тому сьогодні в Інтернет мережах поширено дуже багато відео контенту на найрізноманітнішу тематику, і їх одночасно можуть переглядати мільйони людей у різних місцях Землі. Окрім цього зазначимо, що на різних стрімінгових сервісах окрім відео оригінала, зазвичай знаходяться і його окремі фрагменти, які у багатьох випадках є спотвореними або пошкодженими. Тому, з огляду на зазначене, надзвичайно актуальним є дослідження присвячене удосконаленню відомих та розробленню нових методів аналізу відео контенту для пошуку відео оригінала, а не його спотворених чи пошкоджених копій та окремих фрагментів. Необхідність вирішення цієї проблеми спонукала багатьох науковців до розроблення різноманітних підходів та алгоритмів для проведення аналізу вмісту, класифікації, пошуку та узагальнення візуального контенту. Багатьом із них вдалося не лише побудувати ці алгоритми, їм вдалося також виявити і основні принципи на яких вони повинні базуватися. Зокрема, вони показали, що потужним інструментом для удосконалення відомих та побудови нових алгоритмів є методи штучного інтелекту та машинного навчання. Показали, що саме

розвиток цих методів сприяє стрімкому розвитку інформаційних систем за допомогою яких можна успішно здійснити аналіз відео контенту та розпізнати його оригінал. Виявили, що аналіз відео потоку доцільно проводити за даними результатів порівняння та пошуку збігів у послідовності кадрів (фрагментів). Подібністю кадрів можуть слугувати об'єкти на сцені чи палітра кольорів. Встановили, що в основі сучасних інформаційних системах аналізу відео контенту використовуються здебільшого так звані алгоритми для визначення ключових кадрів. І на основі аналізу способів їх практичного застосування довели, що вони дають змогу сформувати репрезентивну вибірку стислого огляду, яка забезпечує найбільш точне відображення відео змісту. Окрім цього, показали, що ефективне узагальнення відео із виділенням опорних кадрів значно полегшує перегляд і навігацію у великих колекціях відео в Інтернеті, що істотно збільшує залучення глядачів і споживання контенту, а також слугує основним кроком у системах пошуку за фрагментами.

Таким чином, для вирішення поставленої проблеми надзвичайно важливим є аналітичний огляд підходів та методів аналізу відео та фрагментів, які сформовані на методах штучного інтелекту та машинного навчання, а також пошук існуючих концепцій узагальнення візуального контенту. Для проведення такого огляду необхідно проаналізувати такі методи: пошук послідовностей (виявлення об'єктів чи певних дій на кадрах), класифікація (визначення змісту кадрів та розподілення їх до певних категорій), декодування кадрів (опис характеристик конкретного зображення), виявлення аномалій (пошук об'єктів, символів, які є унікальними властивостями фрагмента відносно інших).

Аналіз досліджень та публікацій

Для дослідження методів пошуку ключових кадрів у відеопотоці проведемо аналіз функцій аналізу форм, кольорів та оптичного потоку.

Загалом методів для пошуку кадрів у відеопотоці є доволі багато. Усі вони мають важливе практичне значення. В одних випадках доцільно використовувати одні методи, а в інших випадках – інші. Застосування того чи іншого методу опрацювання візуальних даних визначається структурою цих даних. Тому з метою спрощення їх аналізу поділимо їх умовно на такі категорії: послідовне порівняння; глобальне порівняння, на основі кластеризації та ті які використовують події чи об'єкти.

Методи категорії послідовного порівняння використовуються в основному для вирішення задач визначення подібності між кадрами відеопотоку. Їх сутність полягає у порівнянні кожного наступного кадру із попереднім. Це порівняння доволі часто використовує кольорову гістограму, оскільки відмінність кольорів кадрів у відеофрагменті, що відображають певну подію, здебільшого є незначною (мінімальною). Однак, методи цієї категорії мають і деякі недоліки. Основним із них – це великі затрати часу на опрацювання кадрів відеопотоку та велика похибка у випадку оброблення даних із шумом.

Для стислого огляду сучасних методів, які найбільш наближені до вирішення задач, які повинна виконувати система узагальнення візуальних даних розділимо їх на два типи: звичайні методи та методи із використанням машинного навчання.

Звичайні методи базуються на певній цільовій функції та інструкціях, які не змінюються з часом. Переважна більшість цих функцій використовує в основному конвеєрну сегментацію. Зазвичай такі підходи виділяють характеристики SIFT та оптичний потік. За допомогою дескрипторів SIFT виділяються ключові точки та локальні характеристики кадрів. Для прикладу у роботі “Robust voting algorithm based on labels behavior for video copy detection” [1] виділяють опорні точки кадру (за допомогою детектора Харріка) і відстежують їхні позиції протягом усього відео. Після чого формують безмежно велику кількість траєкторій цих точок. Для знаходження подібностей використовують алгоритми нечіткого пошуку. Цей метод суттєво спрощує локалізацію нечітких дублікатів фрагментів та дає змогу провести узагальнення для відеопотоку. Проте він є дорогим відносно ресурсів для виділення ключових точок на зображеннях. А факт того, що траєкторії точок чутливі до руху камери, роблять алгоритм оптимальним лише у випадках пошуку точних копій відео. Іншим, не менш важливим типом звичайних підходів є методи, які базуються на основі кластеризації, характерною особливістю яких є те, що число кластерів, як правило, повинно задаватися апріорно. Вагомими, щодо удосконалення та розроблення нових методів цього типу, є роботи Tang H. [2], де для визначення ключового кадру у відеопотоці вперше запропоновано використовувати ентропію та щільність групування зображення для розпізнавання жестів руки. Не менш цінними є також і дослідження Vazquez R., який у роботі [3] запропонував знаходити ключові кадри за допомогою методу заснованого на спектральній кластеризації. Унікальність цього методу полягає у тому, що для його практичної реалізації не потрібно проводити обчислення міри подібності із виділенням спільних ознак для двох зображень. Актуальними є також і роботи Wang Y. [4], у яких синтезовано метод, ідея якого полягає у розрахунку матриці подібності та визначенні кластерів на її основі з подальшим пошуком і вилученням ключових кадрів. Характерною особливістю цього методу є те, що у ньому усунено обмеження на вибір одного кадру на кластер. Кількість кадрів, що відбираються з одного класу, залежить від продовження та складності змісту сцен. Порівняно з методами пошуку ключових кадрів на основі класифікації цей метод з обчислювальної точки зору є значно простішим. Основним його недоліком є те, що висновок про значущість кадрів робиться вихідним із положення, що на значущих сценах довше фокусується камера. Коли основні кадри відбираються з довгих послідовних кадрів у кластері, середній кадр кожної послідовності вважається значущим, що нагадує найбільш ранні підходи до пошуку ключових кадрів.

Для усунення обмежень та покращення ефективності звичайних методів розглянемо роботи, які присвячені синтезу моделей із використанням глибокого машинного навчання (багатошарові нейронні мережі). Одним із таких досліджень є робота Янга [5], де представлено двонаправлену короткочасну пам'ять Bi-LSTM, яку використовували налаштовані мережі Graph Attention Networks (GAT) для виділення опорних кадрів із відео. Ця мережа дозволила авторам перетворювати візуальні функції зображення у функції вищого рівня використовуючи механізм трансформації контекстний методів (CFT).

Наступною важливою науковою працею є робота Махасені [6], де вперше було застосовано генеративну змагальну мережу (GAN). Результатом дослідження була розроблена мережа підсумків для навчання мінімізації відстані між навчальними відео та розповсюдження їх узагальнень. Модель складалася з автокодера LSTM як підсумовувача та іншого LSTM як дискримінатора. Таким чином, підсумовувач LSTM був навчений вводити в оману дискримінатор, що змусило підсумовувач отримувати кращі зведення. Така модель продемонструвала високі результати під час експериментів.

У роботі Янг [7] описано особливості використання локальних функцій, зокрема функцій масштабно інваріантного перетворення ознак (SIFT) та функцій, отриманих від згорткової нейронної мережі (CNN). Окрім цього запропоновано інтегровану схему узгодження функції, яка інтегрує узгодження функцій SIFT і функцій CNN між зображеннями для виявлення часткових копій зображень. У цій схемі автори реалізували зіставлення функцій SIFT на основі моделі візуальних слів, щоб виявити потенційні дублікати пар регіонів між зображеннями, а потім зіставили характеристики CNN цих регіонів, витягнутих з згорткового шару мережі CNN для обчислення схожості образів. Також нещодавно у роботі Чжоу та ін. (2018) [8] використали мережу глибокого узагальнення за допомогою навчання з підкріпленням. Вони представили підхід DQSN на основі RL для узагальнення відео. На основі експерименту з навчанням без нагляду та з вчителем, їхня цільова функція дає можливість аналізувати семантику, використовуючи лише прості для отримання мітки на рівні відео.

Ще декілька важливих досліджень у цій області знань ґрунтуються на результатах аналізу просторово-часових зв'язків між частинами відео та використанні сучасних типів нейронних мереж, зокрема згорткових мереж. Важливими у цій області знань є роботи [9], авторами яких, з використанням згорткових нейронних мереж LSTM, синтезовано архітектурну модель декодера і кодера. Ця модель дає змогу моделювати просторово-часовий зв'язок між фрагментами відео. Запропонований на її основі алгоритм ефективно генерує візуальну різноманітність ключових кадрів та механізми їх знаходження.

У 2019 році Юань опублікував роботу [10], в якій розробив метод який дозволяє навчати систему, і створювати нове представлення використовуючи стратегію злиття. Для оцінки серії послідовних кадрів автори застосовують функції втрат. У цьому ж році Елфекі [11] та автори робіт [12] побудували модель у якій вдало поєднали CNN і Gated Recurrent Units (один із типів RNN). Характерною особливістю цієї моделі є генерування векторів для оцінки рівня активності і важливості кожного кадру у відеопотоці.

Загалом автори досліджень вважають, що методи для узагальнення та пошуку ключових кадрів у відео є найбільш ефективними лише у випадках використання машинного навчання.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є огляд та пошук ефективних підходів, які виконують узагальнення відео на основі машинного навчання для систем пошуку.

Виклад основного матеріалу

Порівняльний аналіз літературних джерел показав, що на сьогодні існує низка методів, які використовуються у сучасних дослідженнях для узагальнення відео і які на наш погляд є найбільш продуктивними у випадку їх застосування у системах пошуку за фрагментами.

Враховуючи сучасний стан предметної області ми переконані, що для систем пошуку відео за фрагментами найбільш оптимальними є методи, які використовують машинне навчання без вчителя. Вони дають змогу розробляти моделі, які є незалежним під час обробки даних від втручання користувачів.

Більшість підходів, які базуються на навчанні без вчителя використовують правило, згідно якого репрезентативна вибірка повинна допомогти користувачеві чи іншим компонентам системи зробити висновок відносно вихідного відеоконтенту. В цьому контексті методи зазвичай використовують GAN. Це узагальнення складається із селектора ключових кадрів (оцінюють важливість) та генератора (створює звіт). Особливістю застосування цих підходів є те, що навчання відбувається шляхом реконструкції відео на основі резюме [13]. Розглянемо концепцію цього підходу під час навчання, сутність якої наочно відображена на рис. 1. Зазвичай суматор складається із селектора ключових кадрів, який оцінює їх важливість та генератора, основним завданням якого є реконструкція відео. Реконструюванню відео разом із оригінальними даними в якості вхідних даних навчає дискримінатор (результатом якого є надання оцінки подібності). Процес навчання виглядає наступним чином: суматор намагається обманити дискримінатор під час того, як він намагається навчитись знаходити різницю між узагальненим звітом (ключовими кадрами) та оригінальним відео. Результатом навчання є стан дискримінатора, коли він не може знайти різницю (помилка класифікації приблизно однакова як для реконструйованого так і для оригінального відео).

Для вище продемонстрованої концепції описано процес реконструкції відео на основі резюме. Для того щоб модель виконувала зворотній процес, який в подальшому можна застосовувати, як компонент у

системах пошуку сучасні дослідження пропонують розширений підхід. У цьому випадку використовують пару дискримінаторів. Тоді селектор кадрів (двонаправлений LSTM) знаходить ключові кадри шляхом моделювання тимчасової залежності між кадрами. Далі на основі результатів селектора проводиться оцінка, яка складається із двох GAN [14]. Перший використовується для навчання відносно реконструкції відео на основі узагальнення, другий вчиться виконувати дії навпаки – від оригіналу до ключових кадрів. Розглянемо детальніше функціонування другого модуля GAN. На сьогодні запропоновано декілька варіантів процесу навчання. Одним з них є використання "актор-критик" моделі, яка розглядає задачу вибору опорних кадрів, як задачу генерації послідовностей. "Актор" та "Критик" [15] перебувають в стані постійного обміну результатами, назовемо це змаганням. Стратегія навчання дозволяє критику засвоїти ціннісну функцію і актору ефективно дізнаватися про політику вибору ключових фрагментів. Це допомагає корегувати вибір правильних значень для параметрів моделі. Високу ефективність демонструють також і GAN, які базуються на самоконтролі [16]. У цьому випадку генератор намагається передбачити оцінку важливості на рівні кадру для кожного кадру та створює зважені характеристики кадру на основі тимчасових уявлень необроблених характеристик кадру. Потім необроблені ознаки кадру та зважені ознаки кадру розглядаються як реальні та фальшиві вхідні дані для дискримінатора щоб провести порівняння. Слід врахувати що для захоплення тимчасових залежностей на великій відстані по всьому проміжку відеопослідовності використовується BiLSTM [17]. Недоліком цих концепцій досі залишається нестабільність процесу тренування [18], хоча і останні дослідження намагаються постійно розширювати та покращувати моделі GAN для мінімізації обмежень критеріїв оцінки кадрів.

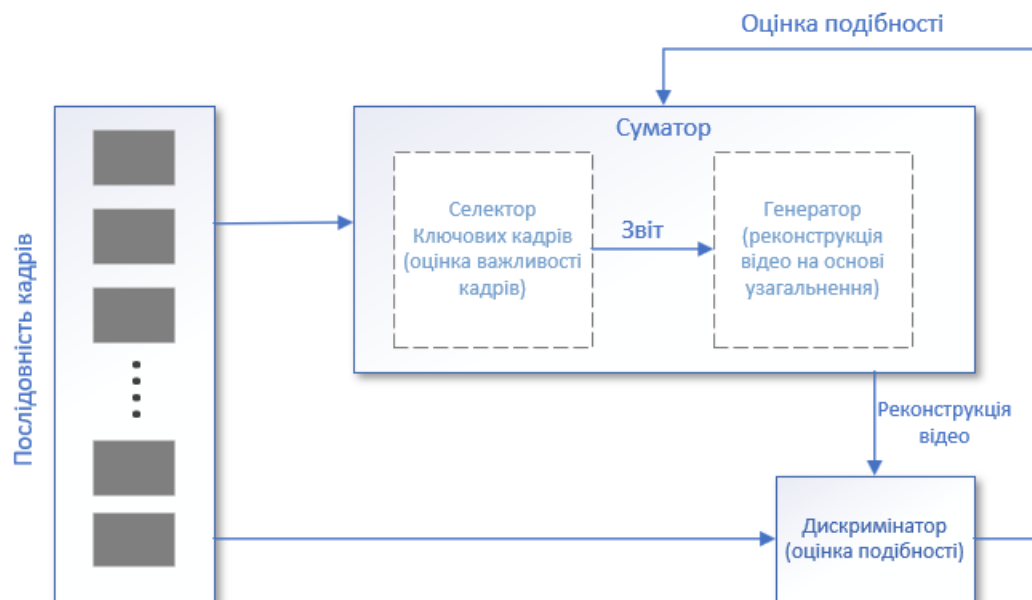


Рис. 1. Високорівневе представлення моделі навчання без вчителя для аналізу узагальнення

Загальна концепція навчання із підкріпленням базується на функції "винагород". Вона поділяється на декілька етапів. На основі вхідних даних у вигляді послідовності кадрів створюється звіт шляхом прогнозування оцінки важливості на рівні кожного кадру. Створений звіт надсилається наступному модулю, який відповідає за кількісну оцінку існуючих (наперед вибраних) характеристик за допомогою створених вручну функцій "винагород". Потім підраховані бали об'єднуються, щоб сформулювати загальне значення "винагороди", яке використовує суматор для навчання. Одним із підходів є тренування суматора, таким чином, щоб він створював різноманітні та репрезентативні вибірки ключових кадрів з використанням нагороди за різноманітність. Ця нагорода (бали або коефіцієнт) вимірює відмінність між вибраними ключовими кадрами, а нагорода за репрезентативність обчислює відстань (що виражає візуальну схожість) між обраними кадрами з кадрів відео, що залишилися. Також для вирішення проблем LSTM відносно затухаючого (vanishing) та вибухаючого (exploding) градієнта використовують незалежні рекурентні нейронні мережі (IndRNN) [19] на основі функції активації – Leaky ReLU (Leaky Rectified Linear Unit) [20].

Загальна концепція аналізу руху ключових візуальних об'єктів базується на основі автокодувальника, де під час аналізу виконуються кроки, ціллю яких є пошук опорних об'єктів та траєкторій їх руху. Після виконання цих кроків створюються сегментовані фрагменти відео із рухом для кожного об'єкта. На наступному етапі використовується онлайн модель автокодувальника об'єкта (Stacked Sparse LSTM Auto-Encoder) [21] для запам'ятовування попередніх станів руху об'єкта шляхом постійного оновлення адаптованої мережі автокодувальника. Останній крок відповідає за реконструкцію фрагментів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Викладено порівняльний аналіз методів опрацювання даних, поданих у форматі відеоконтенту і на його основі визначено, що найбільш оптимальними методами є методи засновані на алгоритмах штучного інтелекту та машинного навчання. Особливо перспективними є методи, практична реалізація яких полягає у моделюванні тимчасових залежностей змінного діапазону з використанням згорткових нейронних мереж та функцій із спеціальними механізмами “уваги”.

Показано також, що для опрацювання “неконтрольованих” відео доцільно використовувати генеративні змагальні мережі у поєднанні із механізмами “уваги” та “актор-критик”.

Виявлено, що спрощення процедури адаптації вимог до даних у різних доменах і сценаріїв їх застосування є можливим лише за умови вдосконалення моделей узагальнення, які навчаються без нагляду.

Література

1. Julien L., Olivier B., Valérie G., Nozha B. Robust voting algorithm based on labels of behavior for video copy detection. 14th ACM International Conference on Multimedia, Santa Barbara, CA, USA, October 23-27. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1145/1180639.1180826>
2. Tang H., Liu H., Xiao W., Sebe N. Fast and robust dynamic hand gesture recognition via key frames extraction and feature fusion. *Neurocomputing*. 2019. Volume 331. P. 424-433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.11.038>.
3. Vázquez-Martín R., Bandera A. Spatio-temporal feature-based keyframe detection from video shots using spectral clustering. *Pattern Recognit. Lett.* 2013. Volume 34. P. 770-779.
4. Qu Z., Lin L., Gao T., Wang Y. An improved keyframe extraction method based on HSV color space. *Journal of Software*. 2013. Vol. 8, Iss. 7. P. 1751-1758.
5. Yang H., Wang B., Lin S., Wipf D., Guo M., Guo B. Unsupervised extraction of video highlights via robust recurrent auto-encoders. *IEEE International Conference on Computer Vision*, Santiago, Chile, 7-13 December 2015. P. 4633-4641.
6. Mahasseni B., Lam M., Todorovic S. Unsupervised video summarization with adversarial LSTM networks. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, USA, 21-26 July 2017. P. 1-10.
7. Jian M., Zhang S., Wu L., Zhang S., Wang X., He Y., Deep key frame extraction for sport training. *Neurocomputing*. 2019. Volume 328. P. 147-156.
8. Zhou K., Xiang T., Cavallaro A. Video Summarisation by Classification with Deep Reinforcement Learning. *British Machine Vision Conf. (BMVC)*. 2018.
9. Lal S., Duggal S., Sreedevi I. Online video summarization: Predicting future to better summarize present. In *IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE. 2019. P. 471-480.
10. Yuan Y., Li H., Wang Q. Spatiotemporal modeling for video summarization using convolutional recurrent neural network. *IEEE Access*. 2019. Volume 7. P. 676-685.
11. Elfeki M., Borji A. Video Summarization Via Actionness Ranking. *IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision (WACV)*, Waikoloa Village, HI, USA, 7-11 January 2019. P. 754-763.
12. Cho K., B. van Merriënboer, Gulcehre C., Bahdanau C., Bougares F., Schwenk H., Bengio Y. Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation. *Proc. of the 2014 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. Doha, Qatar: Association for Computational Linguistics, October 2014. P. 1724-1734.
13. Mahasseni B., Lam M., Todorovic S. Unsupervised Video Summarization with Adversarial LSTM Networks. In *IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. P. 2982-2991
14. Apostolidis E., Metsai A., Adamantidou E., Mezaris V., Patras I. A stepwise, label-based approach for improving the adversarial training in unsupervised video summarization. In *Proc. of the 1st Int. Workshop on AI for Smart TV Content Production, Access and Delivery (AI4TV '19)*. New York, NY, USA: ACM. 2019. P. 17-25.
15. Apostolidis E., Adamantidou E., Metsai A., Mezaris V., Patras I. AC-SUM-GAN: Connecting Actor-Critic and Generative Adversarial Networks for Unsupervised Video Summarization. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. 2020. P. 1.
16. He X., Hua Y., Song T., Zhang Z., Xue Z., Ma R., Robertson N., Guan H. Unsupervised Video Summarization with Attentive Conditional Generative Adversarial Networks. In *Proc. of the 27th ACM Int. Conf. on Multimedia (MM '19)*. New York, NY, USA: ACM. 2019. P. 2296-2304.
17. Graves A., Schmidhuber J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures. *Neural Networks*. 2005. Volume 18. P. 5-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2005.06.042>.
18. Zhou K., Qiao Y. Deep Reinforcement Learning for Unsupervised Video Summarization with Diversity-Representativeness Reward. *Proc. of the 2018 AAAI Conf. on Artificial Intelligence*. 2018.
19. Li S., Li W., Cook C., Zhu C., Gao Y. Independently recurrent neural network (indrn): Building a longer and deeper rnn. *IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2018. P. 5457-5466

-
20. Wang L., Xiong Z., Wang Z., Qiao Y., Lin D., Tang X., Van Gool L. Temporal Segment Networks: Towards Good Practices for Deep Action Recognition,” in Europ. Conf. on Computer Vision (ECCV). Cham: Springer International Publishing. 2016. P. 20–36.
 21. Zhang Y., Liang X., Zhang D., Tan M., Xing P. Unsupervised object-level video summarization with online motion auto-encoder. Pattern Recognition Letters 2018.

КРИВЕНЧУК Ю. П.

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-2504-5833>e-mail: Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua

МАРКО О. М.

Національний університет "Львівська політехніка"

e-mail: oleksandramarko@gmail.com

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ТРЕКІНГУ ОБ'ЄКТІВ НА ВІДЕО

В роботі проаналізовано та наведено результати дослідження теми розпізнавання об'єктів на відео, а також здійснений опис запропонованих раніше методологій, з метою виявлення параметрів, які можна вдосконалити та в подальшому застосувати оптимізовані методи для створення та поширення аналогічних систем в проекті DRINMIX (автоматизована система обслуговування клієнтів), а також у наближених сферах. Виділено та описано такі основні етапи, як розпізнавання об'єкту, відслідковування об'єкту, класифікація об'єкту. Аналіз результатів підтвердив актуальність тематики та доцільність створення системи розпізнавання та трекінгу об'єктів на відео, на основі проробленої роботи зроблений висновок, що найбільш ефективним інструментом для виконання цієї роботи стане використання методів глибинного навчання.

Ключові слова: об'єкт, відео, розпізнавання об'єктів, трекінг об'єктів, згорткова нейронна мережа.

Yurii KRYVENCHUK, Oleksandra MARKO

Lviv Polytechnic National University

CREATION OF OBJECT RECOGNITION AND TRACKING SYSTEM

In modern society, video recording systems have become widespread, allowing them to recognize objects, their absence, and changes in position. In the vast majority of intelligent systems for video monitoring and determining objects through their image, such objects as human faces, printed publications, and state registration numbers are taken into consideration. At the same time, the circumstances for accepting an image are quite strict, since there is a limit on illumination, background, location relative to the lens, and so on. All this significantly facilitates the joint work of a person with a computer, and creates the prerequisites for using all kinds of systems of artificial origin of the mind. The primary goal in the development of a method and software for the automatic design of a video surveillance system is the purpose of recognize an object whose image is transmitted through the camera. Since the image of any object depends on many moments of its direction about the video camera, illumination, characteristics of the recorder, static and dynamic characteristics of the object, it is rather difficult to arrange and present a picture in the guise of a specific mathematical model. As a result, the methods for implementing a computer representation are significantly dependent on the goals being solved and are occasionally inferior to generalization. As a result, the bulk of these methods is considered non-linear. This affects the need to accumulate the calculation of computer power and the difficulty of algorithms for work acquired through the technical channels of the resulting image. In addition to technical indicators that distort the quality of a digital image, several external moments are considered, and these are: lighting around the scene, moving objects within it, etc. As a result, to obtain the best accuracy of character recognition, it is necessary to take into account all the details. The aim of this work is to study the topic of object recognition in images and video, in order to further use the results of work in creating a system for object recognition in images and video.

Keywords: image, video, object, object detection, object tracking, convolutional neural network.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Дивлячись і бачачи, ми пізнаємо світ, у якому живемо. Це середовище оточує нас нескінченними типами предметів і вражень. Інакше кажучи, зір та можливість бачити – це засіб для розуміння навколишнього світу. Як саме працює зорова система, залишається загадкою, яку потрібно розгадати, навіть незважаючи на те, що фізіологи досліджують це явище протягом десятиліть. Говорячи про зір, замінивши живу істоту обчислювальним пристроєм, ми маємо широкі і абстрактне вираження комп'ютерного зору. Його можна узагальнити як процес, коли комп'ютери аналізують цифрові зображення або відео та отримують від цього розуміння світу що їх оточує.

Відстеження об'єктів — це область комп'ютерного зору, яка має багато практичних застосувань, таких як відеоспостереження, взаємодія людини та комп'ютера та навігація роботів. Це добре вивчена проблема і в багатьох випадках складна для вирішення. Проблема відстеження об'єкта у відео можна узагальнити як завдання пошуку положення об'єкта в кожному вилученому кадрі з відеопотоку. Можливість відстежувати об'єкт у відео залежить від багатьох факторів, таких як знання про цільовий об'єкт, тип параметрів, що відстежуються, і тип відео, що показує об'єкт.

Відстеження об'єктів є важливою частиною співпраці людини та комп'ютера в безперервному середовищі, у сенсі, що дозволяє комп'ютеру отримати кращу модель реального світу. Наприклад, у сфері застосування автономних транспортних засобів, де людина не може досить точно та швидко передати стан навколишнього середовища з огляду на вимоги агента. Широка область застосування відображає важливість надійного, точного та ефективного відстеження об'єктів. Існує кілька важливих кроків для ефективного відстеження об'єкта, включаючи вибір моделі для представлення об'єкта та методу відстеження об'єкта, який підходить для виконання завдання.

Системи виявлення об'єктів розпізнають наявність або відсутність об'єктів у певних сценах і точках огляду камер. Завдяки, відслідковуванню об'єктів на відео, в подальшому 'розумні' системи зможуть більш чітко передбачувати ті чи інші потенційні зміни в поведінці об'єктів, що дозволить покращити якість обслуговування людей вищезгаданими системами. Наприклад, за допомогою виявлення об'єктів на відео чи зображенні можна відслідковувати ціль та визначати її точне місце знаходження в просторі, ця інформація дозволить роботизованим системам якісніше, швидше та точніше обслуговувати своїх потенційних клієнтів. Також, варто зазначити, що за допомогою системи визначення та трекінгу об'єктів на відео можна проаналізувати рухи людей, та застосувати такий аналіз в побудові патернів рухів для вище згаданих роботизованих систем, а також можна використовувати аналіз рухів об'єктів у сентиментальному аналізі (визначення рівня сп'яніння та ін.)

Потреба дослідження цієї теми підтверджена малою кількістю публікацій та зростанням попиту на такі розробки у зв'язку з динамічним розвитком індустрії сервісів. Варто зазначити, що такі системи поширені на азійському ринку та в північній Америці, отже найближчим часом схожі потреби виникнуть на українському ринку де, власне і планується застосування результатів цього дослідження.

Аналіз досліджень та публікацій

У статті [1] автор обговорює керування жестами системою за допомогою обробки зображень вилучених з відеопотоку. Робототехнічна промисловість розвиває багато нових тенденцій для підвищення ефективності, доступності та точності систем. Роботи замінюють людей. Але все одно ці роботи потребують уваги та обслуговування людини до того ж для керування роботом потрібна людина. Роботи можуть мати різні типи підключення до комп'ютерної системи: дротові або бездротові. Проте, незважаючи на тип з'єднання усі роботи мають пристрій керування. Для керування робототехнікою за допомогою фізичних пристроїв популярним методом є керування жестами. Основна мета використання жестів полягає в тому, що він забезпечує більш природний спосіб керування та забезпечує насичену та інтуїтивну форму взаємодії з роботизованою системою. Сервісні роботи безпосередньо взаємодіють з людьми, тому знаходження більш природного і простого інтерфейсу користувача має принципове значення. У цьому дослідженні, робота зосереджена на питаннях, пов'язаних з маніпуляцією та навігацією в навколишньому середовищі. Для вирішення цієї проблеми автор реалізував систему, базовану на використанні згорткової нейронної мережі. За допомогою такого сервісу користувач може давати команди бездротовому роботу за допомогою жестів. За допомогою цього методу користувач може керувати роботом за допомогою жестів долонею, взаємодіючи, таким чином, з роботизованою системою.

У роботі [2] досліджено системи безперервної зйомки в які інтегровані функції розпізнавання об'єктів, оскільки людину можна легко відволікти, і одна помилка може призвести до великої катастрофи. Таким чином, системи відеоспостереження значно полегшують роботу споживачам та забезпечують безпеку та контроль там, де він потрібен весь час. У цій роботі автором запропоновано алгоритм (сформовану архітектуру згорткової нейронної мережі, на основі паралельного вилучення ознак), який допомагає виявляти рухомий об'єкт і класифікувати його як людину та відстежувати рух людини. Це можна зробити без будь-якого використання сенсорних пристроїв. У цій статті запропоновану систему можна розділити на три етапи: виявлення, відстеження та аналіз дій. Виявлення людини здійснюється поєднанням морфологічної процедури та особливого методу екстракції.

Методики, викладені в [3], варіюються від дуже простого алгоритму до опублікованих методів, які класифікуються на основі швидкості, вимог до пам'яті та точності. Вони використовували такі методи, як різниця кадрів, віднімання фону та виявлення тіні в реальному часі, адаптивна модель суміші фону для методу відстеження в реальному часі. Вони використовували алгоритми різного рівня точності та обчислювальної складності. Деякі з них також можуть вирішувати проблеми в реальному часі, як-от сніг, дощ, рухомі гілки, об'єкти, що перекривають досліджуваний об'єкт, інтенсивність світла або повільно рухомі об'єкти. Аналіз зображень відокремлених з відеопотоку відбувався з застосуванням згорткової нейронної мережі.

Проблема досягнення високої швидкості розпізнавання з низькою частотою помилок виявлення і відстеження людини у відеопослідовності полягає в тому, що алгоритмам потрібна максимізація продуктивності та зменшення часу реакції. Зазначеними причинами є вплив складності сцени, зміни масштабу та взаємодії фону та людини. Двоетапне рішення для обробки, яке полягає в виявленні людини, і відстеження людини за допомогою двох шаблонних класифікаторів, представлені у [4].

Існує три основні етапи відеодослідження: виявлення цікавих об'єктів у відеосцені, відстеження таких об'єктів від кадру до кадру та аналіз слідів об'єктів для розпізнавання їх діяльності. Виявлення людей на відео є складною проблемою через рух об'єктів. У [5] дослідники розробили детектор для переміщення людей на відео з можливо рухомими камерами та фоном, перевірили кілька різних схем кодування рухомого об'єкта та показавши, що орієнтовані гістограми диференційного оптичного потоку дають максимальну продуктивність.

Виклад основного матеріалу

Відстеження об'єкта у відео можна виразити як процес пошуку шляху руху об'єкта в часі шляхом визначення його положення в кожному кадрі відео. Відстеження об'єктів стало одним з найпопулярніших

предметів дослідження в області комп'ютерного зору. Хоча це добре вивчене питання, вона залишається проблемою в багатьох аспектах. Створення трекерів для певних класів об'єктів, таких як люди чи обличчя, досягло значного прогресу протягом багатьох років, тоді як трекери для загальних об'єктів продовжують залишатися складною областю. Об'єкти, які різко змінюють зовнішній вигляд через, наприклад, розтягнення або зміни світла, шум у зображеннях, складний рух і складні форми об'єктів, є деякими прикладами того, чому загальне відстеження об'єктів вважається складною проблемою [6, 7]. Уявіть, що ви дивитеся на довільний рухомий об'єкт, який раптово змінює траєкторію руху або особливості зовнішнього вигляду, такі як форма чи колір. Це разом із кількома іншими об'єктами в декорації, можуть вести себе аналогічно. Відстеження об'єкта в більшості випадків було б складним завданням навіть для людського ока. З огляду на це, це означає, що це майже неможливе завдання для комп'ютера. З огляду на це, існують способи спростити відстеження, застосувавши деякі обмеження. Майже всі алгоритми припускають, що рух відстежуваного об'єкта плавний, без різких змін. Постійна швидкість або прискорення, а також попередні знання про зовнішній вигляд об'єкта є іншими способами спрощення завдання [7]. Процес побудови об'єктного трекера зазвичай поділяється на кілька кроків, якими є представлення об'єкта, виявлення об'єкта та відстеження об'єкта [8]. Цей розділ міститиме ретельний огляд різних методів відстеження об'єктів, що є основною темою цієї дипломної роботи. Однак він також коротко охопить область представлення об'єктів та виявлення об'єктів, оскільки це важливі кроки в процесі успішного відстеження об'єктів. Таким чином читач отримує кращу основу та розуміння процесу побудови об'єктного трекера. Загальна методологія опрацювання об'єкта в такій системі описана нижче.

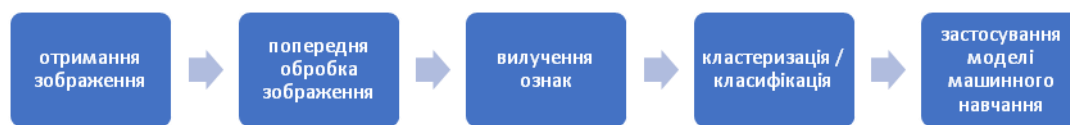


Рис. 1. Методологія опрацювання зображення

- Отримання зображень: обробку зображень можна в широкому розумінні визначити як дію отримання зображення з певного джерела. Зйомка зображення під час обробки зображень завжди є першим кроком у послідовності робочого процесу, оскільки без зображення обробка неможлива. Якщо обладнання не налаштовано належним чином і не вивіряно, то можуть виникнути візуальні артефакти, які можуть ускладнити обробку зображення. Одна з форм отримання зображення в обробці зображень відома як отримання зображення в реальному часі. Зазвичай це передбачає отримання зображень із джерела, яке автоматично знімає зображення. Отримання зображень у реальному часі створює потік файлів, які можна автоматично обробляти, ставити в чергу для подальшої роботи або зшивати в єдиний медіаформат (відео або набір кадрів).

- Попередня обробка зображення: це обробка зображень за допомогою математичних операцій за допомогою будь-якої форми обробки сигналу, для якої вхідним є зображення, серія зображень або відео, наприклад фотографія або відеокادر; Результатом обробки зображення може бути або зображення, або набір характеристик або параметрів, пов'язаних із зображенням.

- Вилучення ознак: це тип зменшення розмірності, який ефективно представляє цікаві частини зображення у вигляді компактного вектора ознак. Цей підхід корисний, коли зображення великі, а для швидкого виконання таких завдань, як зіставлення та пошук зображень, потрібне зменшене представлення функцій.

- Вилучення ознак: це тип зменшення розмірності, який ефективно представляє цікаві досліднику частини зображення у вигляді компактного вектора ознак. Цей підхід корисний, коли зображення великі, а для швидкого виконання таких завдань, як зіставлення та пошук зображень, потрібне зменшене представлення функцій.

- Кластеризація: це завдання поділу сукупності або точок даних (в нашому випадку це пікселів на зображенні чи відеокадри) на кілька груп таким чином, щоб точки даних в тих самих групах були більш схожими на інші точки даних у тій же групі, ніж в інших групах. Простіше кажучи, мета полягає в тому, щоб відокремити групи зі схожими ознаками та об'єднати їх у кластери.

Щоб мати можливість відслідковувати об'єкт, що цікавить, його спочатку потрібно представити у спосіб, який має сенс для комп'ютера. Властивості, що стосуються зовнішнього вигляду та форми, зазвичай використовуються як основа для представлення. Подання зовнішнього вигляду або подання форми можна використовувати окремо для представлення об'єкта, але також можна використовувати для цієї мети в комбінації. Зовнішні фактори, такі як область застосування, мета та ціль, визначають, як має бути представлений об'єкт або об'єкти. Представлення, у свою чергу, визначає вибір відповідного алгоритму для відстеження.

Уявлення об'єкта = Форма + Зовнішній вигляд

Огляд наборів даних

Зробивши аналіз статей та робіт на схожі теми, зроблено висновок про доцільність використання кількох наборів даних для навчання моделі. Очевидно, що наборів даних, які включають в себе лише зображення одного спрямування варто уникати, адже майбутня система спрямована на трекінг не лише однотипових об'єктів, а навпаки – її завданням є розпізнавання та відслідковування одразу кількох об'єктів в кожному кадрі.

Таблиця 1 [1]

Огляд наборів даних, що містять зображення різних класів

<i>База даних</i>	<i>Кількість прикладів</i>	<i>Роздільна здатність</i>	<i>Колір</i>	<i>Кількість категорій</i>	<i>Особливості</i>
Caltech 101	9146	300×200	RGB	101	Орієнтовані об'єкти (наприклад мотоцикли, літаки) завжди розміщені зліва направо, а вертикальні структури (наприклад будинки) перевернуті в нетипові положення відносно своєї стандартної осі.
Caltech 256	30 607	351×351	RGB	256	До кожного зображення додається кілька анотацій – координати рамки, в якій знаходиться об'єкт і детальний опис.
ImageNet	14 197 122	469×387	RGB	21 841	Зображення в базі даних організовані в ієрархію.
Microsoft Common Objects in Context (COCO)	2 500 000	не вказано	RGB	80	Зображення різних побутових сцен та звичайних предметів у буденному використанні.
Open Images	9 178 275	не вказано	RGB	600	в середньому 8 описаних об'єктів на 1 кадр
YFCC100M	100 000 000	не вказано	RGB	не вказано	Великий і різноманітний набір даних зображень і відео

Усі вище наведені набори даних проаналізовано, та виділено переваги та недоліки кожного. Варто зазначити що для побудови повноцінної системи розпізнавання та трекінгу об'єктів варто скористатись набором даних де є не лише статичні зображення, а й динамічні послідовності кадрів з одними і тими ж об'єктами на них. Відповідно як результат подальша робота над реалізацією ідеї проводитиметься з опрацюванням наборів даних Open Images та YFCC100M, адже ці набори даних відповідають вимогам, а також містять велику кількість екземплярів для дослідження та тренування нейромережі.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеної роботи досліджено наявні методи та підходи до детекції об'єктів на зображеннях та відео. На основі проаналізованих наборів даних, визначено з якими буде проведено подальшу роботу, зокрема тренування згорткової нейронної мережі, а також застосування алгоритму при створенні системи розпізнавання об'єкту на зображеннях (відеокадрах). Загалом, дослідження теми розпізнавання об'єктів довело актуальність обраної теми, адже на теренах України дана тема не є широко досліджуваною, до того ж з кожним днем потреба застосування такої системи зростає. Щодня запускають нові сервіси, що обслуговують людей – розробка такої системи посприє зростанню ефективності та швидкодії вищевказаних сервісів.

Література

1. Zhu H., Wei H., Li B., Yuan X., Kehtarnavaz N. A Review of Video Object Detection: Datasets, Metrics, and Methods. Applied Sciences. 04, 2020;10(21):7834.
2. Arulprakash E., Aruldoss M. A study on generic object detection with emphasis on future research directions. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157821002020>
3. Tamilselvan L., Ravichandran M. A STUDY ON OBJECT DETECTION. 2016.

-
4. Chahal K.S., Dey K. A Survey of Modern Object Detection Literature using Deep Learning. arXiv:180807256. 22, 2018. URL: <http://arxiv.org/abs/1808.07256>
 5. Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., et al. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. arXiv:170404861. 2017. URL: <http://arxiv.org/abs/1704.04861>
 6. Wu J., Peng B., Huang Z., Xie J. Research on Computer Vision-Based Object Detection and Classification. B: Li D., Chen Y. Computer and Computing Technologies in Agriculture VI. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. p. 183–8. (IFIP Advances in Information and Communication Technology).
 7. Irram S., Ahmad S.F. Research on Object Detection in Video Streaming Using Deep Learning. 10.
 8. Ahmed M., Hashmi K.A., Pagani A., Liwicki M., Stricker D., Afzal M.Z. Survey and Performance Analysis of Deep Learning Based Object Detection in Challenging Environments. Sensors. 2021; 21(15):5116.

КРИВЕНЧУК Ю. П.

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-2504-5833>e-mail: Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua

ЯКИМІВ Р. Ю.

Національний університет "Львівська політехніка"

e-mail: roman.yakymiv.knm.2018@lpnu.ua

СИСТЕМА АНАЛІЗУ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ ВІКУ

В роботі наведено результати дослідження теми апроксимації віку людини за її обличчям та розроблення системи для вирішення такої задачі, з метою покращення якості та збільшення швидкодії такого типу систем, їх поширення та впровадження у відповідні сфери в Україні. Виділено та описано такі основні етапи: розпізнавання обличчя, визначення ознак, апроксимація віку. Після проведення аналізу результатів було виявлено, що створення системи апроксимації віку людини за зображенням її обличчя є актуальним та доцільним завданням на сьогодні, а найбільш ефективним інструментом для цього є використання методів глибокого навчання та згорткових нейронних мереж.

Ключові слова: апроксимація віку, згорткові нейронні мережі, обличчя.

Yurii KRYVENCHUK, Roman YAKYMIV

Lviv Polytechnic National University

CREATION OF AGE ESTIMATION SYSTEM

We are surrounded by different transmitting and processing information devices on a daily basis. Analysis of certain selected characteristics of each person allows humanity to achieve previously unthinkable technological development. In particular, the human face. We can predict a person's age, determine his mood or identify someone in the crowd using modern algorithms. As a "window to the soul", the human face provides important information related to its individual traits. With the help of this information, a person can determine such characteristics as ethnic origin, gender, age, and emotions, on the basis of which he is able to take appropriate action, which plays a significant role in non-verbal communication between people. Age estimation is useful in applications where you do not need to specifically identify a person, but we want to know (approximate) their age. With the help of the age approximation system, it is possible to ensure partial digitalization of security control and monitoring systems. With the help of a monitoring camera, the age estimation system can identify minors and prevent them from entering places where they are not allowed; not to allow minors to buy tobacco products or alcohol from vending machines; to warn the elderly person of possible danger. Age assessment software can also be used in healthcare systems. The authors personally are interested in approximating human age based on images to personalize human-machine interaction. The paper has the description and the results of the creation of an age estimation system, the basis of which is a convolutional neural network. The user can connect with the system through a simple interface which allows you to upload the image for analysis or turn on the camera to get age estimates in real-time. The practical value of this work is the developed high-quality system which is ready for use and implementation in the relevant fields.

Keywords: age approximation, convolutional neural networks, face.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Вік є фундаментальною характеристикою людини, визначивши та проаналізувавши яку ми отримуємо змогу швидко дізнатись важливу інформацію про особу чи групу людей. Точно визначити вік людини за виглядом неможливо, тому буде апроксимовано її вікову категорію. Інформацію, яку надасть автоматизована система апроксимації віку можна використовувати для автоматизованого збору та аналізу даних, у безпекових та контрольних цілях, для персоналізації людино-машинної взаємодії.

Дану розробку доцільно буде використовувати у автоматизованих магазинах та закладах для аналізу залежностей поведінки відвідувачів та їхнього віку. Такі заклади популяризуються за кордоном, та невдовзі з'являться і в Україні.

Розроблену систему буде використано для персоналізації інтерактивної взаємодії людини з високотехнологічною розважальною системою "Робот-бармен". У реальному часі система зможе визначити вік людини за допомогою зображення з камери, що дозволить персоналізувати голосову взаємодію з розважальною системою.

Аналіз досліджень та публікацій

Запропонована в [1] робота заснована на двійковому класифікаторі, який визначає те, чи два вхідні зображення об'єднані в один і той же клас, і тренує модель згорткової нейронної мережі (CNN), використовуючи метод глибокого метричного навчання на основі сіамської мережі. Для зближення результатів навчальної сіамської мережі два класи, для яких вікові відмінності нижче певного рівня дистанції, розглядаються як один клас, тому відношення позитивних зображень бази даних збільшується. Метод глибокого метричного навчання навчає модель CNN вимірювати схожість лише на основі даних про вік, але ми виявили, що накопичені дані про стать також можна використовувати для порівняння віку. Таким чином, ми застосували багатозадачний підхід до навчання, щоб розглянути гендерні дані для більш точної оцінки віку.

Публікація [2] зосереджується на оцінці віку, класифікації віку та класифікації статі за нерухомими зображеннями обличчя людини. Автори навчають різні моделі для кожної проблеми, а також проводять порівняння між створенням спеціальної архітектури CNN (згорткової нейронної мережі) та використанням різних архітектур CNN як екстракторів функцій, а саме VGG16, попередньо навченого на VGGFace, ResNet50 та SE-ResNet50, попередньо навченого на VGGFace2. Автори також забезпечили базову продуктивність різних алгоритмів машинного навчання для вилучення функцій, що дало нам найкращі результати. Було помічено, що навіть проста лінійна регресія, натренована на таких витягнутих ознаках, перевершувала навчання CNN, ResNet50 і ResNeXt50 з нуля для оцінки віку.

У роботі [3] запропоновано попереднє дослідження щодо підвищення продуктивності попередньо навчених глибоких мереж шляхом застосування стратегій постобробки. Основна перевага щодо стратегій точного налаштування полягає в простоті та низьких обчислювальних витратах на етапі постобробки. Наскільки відомо, ця стаття є першим дослідженням щодо оцінки віку, яке пропонує використовувати стратегії постобробки для функцій, отриманих за допомогою попередньо навчених глибоких мереж. У представленому методі використовується набір попередньо навчених згорткових нейронних мереж (CNN) для вилучення ознак із вхідного зображення обличчя. Потім метод виконує об'єднання на рівні ознак, зменшує розмірність простору ознак і оцінює вік людини за допомогою нейронної мережі з прямим зв'язком (FFNN). Було оцінено ефективність даного методу на загальнодоступному наборі даних (Adience Benchmark of Unfiltered Faces for Gender and Age Classification) і на наборі даних неідеальних зразків, на які впливали контрольовані повороти, які ми зібрали в нашій лабораторії. Цей метод оцінки віку отримав кращі або порівнянні результати щодо найсучасніших методів і досяг задовільної роботи в неідеальних умовах. Результати також показали, що CNN, навчені на загальних наборах даних, можуть отримати задовільну точність для різних типів зображень перевірки, також без застосування методів тонкого налаштування.

Автори [4] намагались вирішити проблему різних оптичних та рухових ефектів розмиття. Такі ефекти зазвичай викликають проблеми з повним охопленням таких рис обличчя, як зморшки, які є важливими для оцінки віку, тим самим погіршуючи точність. Більшість попередніх досліджень щодо оцінки віку було проведено для вхідних зображень, майже без ефекту розмиття. Щоб подолати це обмеження, автори пропонують використовувати глибоку згорткову нейронну мережу ResNet-152 для оцінки віку, яка стійка до різних оптичних ефектів і ефектів розмиття руху від датчиків видимого світла. Було проведено експерименти з різними оптичними та розмитими зображеннями, створеними з баз даних паркової лабораторії старіння розуму (PAL) та баз даних черепно-лицевої поздовжньої морфологічної бази даних обличчя (MORPH), які є загальнодоступними. Згідно з результатами, запропонований метод показав кращу оцінку віку, ніж попередні методи.

Стаття [5] представляє багатоцільовий алгоритм для одночасного виявлення обличчя, вирівнювання обличчя, оцінки пози, розпізнавання статі, виявлення посмішки, оцінки віку та розпізнавання обличчя за допомогою єдиної глибокої згорткової нейронної мережі (CNN). Запропонований метод використовує багатозадачну систему навчання, яка регулює спільні параметри CNN і створює синергію між різними доменами та завданнями. Великі експерименти показують, що мережа краще розуміє обличчя і досягає найсучасніших результатів для більшості цих завдань.

У дослідженні [6] показано, що для оцінки віку та гендерної класифікації можна отримати значне покращення, вивчаючи уявлення з використанням глибоких згорткових нейронних мереж (CNN). Метод нейронної мережі з прямим зв'язком, використаний у цьому дослідженні, підвищує надійність для дуже варіабельних завдань розпізнавання без обмежень для визначення статі та вікової групи. Це дослідження було проаналізовано та підтверджено для прогнозування статі та оцінки віку як для набору даних обличчя Ессекса, так і для контрольного показника Adience. Отримані результати показують, що запропонований підхід забезпечує значний приріст продуктивності, дана модель досягає дуже цікавої ефективності та найсучаснішого рівня оцінки як за віком, так і за статтю.

На основі легкої згорткової нейронної мережі в статті [7] пропонується покращена мережа ShuffleNetV2, заснована на механізмі змішаної уваги (MA-SFV2: Mixed Attention-ShuffleNetV2), шляхом перетворення вихідного шару, об'єднання методів класифікації та регресійної оцінки віку та виділення важливих функцій попередньої обробки зображень і методів збільшення даних. Вплив векторів шуму, таких як інформація про навколишнє середовище, не пов'язана з обличчями на зображенні, зменшується, тому точність остаточної оцінки віку можна порівняти з сучасною.

У [8] автори пропонують нову архітектуру CNN під назвою Fusion Network (Fusion-Net) для вирішення проблеми оцінки віку. Окрім зображення всього обличчя, FusionNet послідовно приймає кілька вікових патчів на обличчі як частину вхідних даних, щоб підкреслити вікові риси. За допомогою експериментів було показано, що FusionNet значно перевершує інші найсучасніші моделі за тестом MORPH II.

У [9] розглядався ефект використання оцінки віку на основі нейронної мережі глибокої згортки (CNN) як зручності для моніторингу пішоходів, які переходять на перехрестях. У цій роботі були використані дві популярні попередньо навчені моделі глибоких згорткових нейронних мереж (DCNN), які нещодавно досягли найкращої продуктивності в задачах виділення рис обличчя: VGG-Face і ResNet-50. Автори об'єднали ці дві моделі для підвищення ефективності запропонованої системи. Було проведено експерименти, щоб оцінити систему на основі набору даних VGGFace2, що складається з 3,31 мільйона зображень обличчя. За результатами експерименту було виявлено розрив у результативності виявлення між цими віковими групами: діти від (00-10) років та люди похилого віку від 55 років і більше. Крім того, було відзначено, що запропонована модель оцінки віку пішохода є високою, а також хороший результат можна отримати, якщо використовувати модель за новим призначенням.

Автори [10] запропонували високоефективну систему оцінки віку із спільною оптимізацією алгоритму оцінки віку та системою глибокого навчання. У співпраці з міською мережею наглядю ця система може забезпечити аналіз вікових груп для розумної демографії. Спочатку було створено тривірневу архітектуру туманних обчислень, що включає край, туман і шар хмари, яка безпосередньо обробляє оцінку віку з необроблених відео. Далі проводиться оптимізація алгоритму оцінки віку на основі CNN з розподілом міток і дивергенцією K-L, вбудованим у шар туману, і оцінюємо модель на основі останнього набору даних про дике старіння. Результати експерименту свідчать, що дана система динамічно збирає демографічні дані на віддаленій відстані без контакту та автоматично проводить аналіз населення міста та навчання вікової моделі було прискорено без втрати прогресу навчання чи якості моделі. Наскільки відомо, це перша інтелектуальна демографічна система, яка має потенційні можливості для підвищення ефективності розумних міст і міського життя.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є створення швидкодіючої та якісної системи апроксимації віку людини з можливістю аналізу зображення та роботи у режимі реального часу для застосуванні у високотехнологічній розважальній системі.

Виклад основного матеріалу

Проаналізувавши роботи у численних джерелах, було прийнято рішення для навчання моделей нейронної мережі обрати кілька наборів даних та об'єднати їх частини. У таблиці 1 наведено основні характеристики проаналізованих датасетів.

Таблиця 1 [1]

Огляд наборів даних, що містять обличчя людей з казаним віком

База даних	Кількість прикладів	Вік	Обличчя чоловіків, %	Особливості
UTKFace Dataset	20000	0-116	52	Обличчя різних етносів
IMDB-WIKI	523051	0-100	59	Обличчя відомих людей
All-Age-Faces	13322	2-80	44,6	Переважає азіатська зовнішність

Етапи процесу апроксимації віку

Автоматизований процес апроксимації віку поділяють на три основні етапи: виявлення обличчя; аналіз зображення з вилученням ознак; класифікація вікової категорії.

Виявлення обличчя. Виявлення обличчя на зображенні є складним завданням через велику кількість варіацій ключових характеристик, а саме різні розміри обличчя на зображенні, різні перспективи, освітлення, фон та саму різноманітність людських лиць. Також на зображенні можуть бути й інші об'єкти, окрім людей.

Алгоритми розпізнавання обличчя зазвичай спершу шукають пару людських очей, адже це одна з характеристик, яку найлегше виявити. Знайшовши область обличчя, він виконує додаткові тести, щоб підтвердити, що він насправді виявив обличчя. Одним з найпоширеніших для виявлення обличчя є метод каскад Хаара, що використовує набори прямокутних областей (фільтрів) з різними числовими характеристиками, які перемішуються по зображенню і порівнюються з його частинами для виявлення збігів. Даний метод має високу швидкодію але його недоліком є складність визначення числових характеристик прямокутних областей для ефективного аналізу зображення. Щоб побороти цей недолік використовують згорткові нейронні мережі, що надає змогу автоматично визначити оптимальні значення фільтрів та збільшує ефективність проведеного аналізу, проте вимагає більшу обчислювальну потужність. Після виявлення обличчя на зображенні здійснюється кадрування, що залишає лише область зображення самого обличчя та певну маржу.

Аналіз зображення обличчя. Для проведення аналізу зображення обличчя найоптимальніше використовувати згорткову нейронну мережу, що на відміну від традиційних класифікаторів з наперед визначеними значеннями фільтрів, дозволяє автоматизувати процес визначення ваг фільтрів, що виявляють наявність певних характеристик на зображенні. Це здійснюється за допомогою тренування нейронної мережі на навчальних даних. Проаналізувавши численну кількість робіт, було прийнято рішення обрати кілька архітектур згорткових нейронних мереж та натренувати їх, після чого на основі швидкодії та коректності вибрати найоптимальнішу.

Класифікація вікової категорії. Класифікація вікової категорії зображеної людини відбувається на основі аналізу нейронною мережею виявлених за допомогою згорткової нейронної мережі характеристик обличчя та їх відповідності певним віковим категоріям.

Принцип роботи системи наведено на рис. 1.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеної роботи було створено систему апроксимації віку людини за зображенням її обличчя. Ця розробка дозволяє визначити вік особи на завантаженому зображенні, а також здійснювати це у реальному часі. Детальне дослідження задачі апроксимації віку людини показала, що система має застосування у багатьох галузях, наприклад розваг, збору даних, безпеки та моніторингу. Оскільки ця галузь недостатньо досліджена в Україні, то дана розробка є доцільною та актуальною. Точність розробленої системи становить 80%, що є доволі хорошим показником, але наступні дослідження можуть бути

спрямовані на досягнення вищої якості за допомогою кращої підготовки даних, збільшення кількості епох при тренуванні нейронної мережі та скрупульознішого підбору гіперпараметрів.

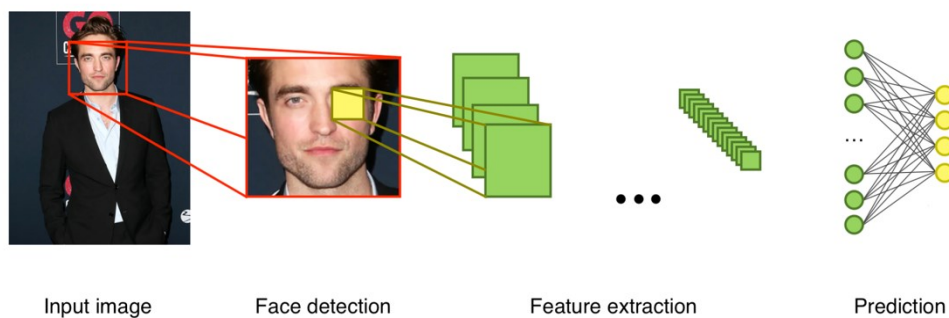


Рис. 1. Принцип роботи системи

Література

1. Y. Jeong, S. Lee, D. Park, i K. H. Park, «Accurate age estimation using multi-task Siamese network-based deep metric learning for frontal face images», *Symmetry*, 10, 9, 2018, doi: 10.3390/sym10090385.
2. V. Sheoran, S. Joshi, i T. R. Bhayani, «Age and Gender Prediction Using Deep CNNs and Transfer Learning», *Communications in Computer and Information Science*, 1377 CCIS, p. 293–304, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-1092-9_25.
3. Anand, R. D. Labati, A. Genovese, E. Munoz, V. Piuri, i F. Scotti, «Age estimation based on face images and pre-trained convolutional neural networks», 2018, вип. 2018-January, p. 1–7. doi: 10.1109/SSCI.2017.8285381.
4. J. S. Kang, C. S. Kim, Y. W. Lee, S. W. Cho, i K. R. Park, «Age estimation robust to optical and motion blurring by deep residual CNN», *Symmetry*, 10, 4, 2018, doi: 10.3390/sym10040108.
5. R. Ranjan, S. Sankaranarayanan, C. D. Castillo, i R. Chellappa, «An All-In-One Convolutional Neural Network for Face Analysis», 2017, p. 17–24. doi: 10.1109/FG.2017.137.
6. M. K. Benkaddour, «CNN based features extraction for age estimation and gender classification», *Informatica (Slovenia)*, 45, 5, p. 697–703, 2021, doi: 10.31449/INF.V45I5.3262.
7. X. Liu, Y. Zou, H. Kuang, i X. Ma, «Face image age estimation based on data augmentation and lightweight convolutional neural network», *Symmetry*, 12, 1, 2020, doi: 10.3390/SYM12010146.
8. H. Wang, X. Wei, V. Sanchez, i C.-T. Li, «Fusion network for face-based age estimation», 2018, p. 2675–2679. doi: 10.1109/ICIP.2018.8451606.
9. N. Y. Abdullah, M. T. Ghazal, i N. Waisi, «Pedestrian age estimation based on deep learning», *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 22, 3, p. 1548–1555, 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v22.i3.pp1548-1555.
10. Z. Hu, P. Sun, i Y. Wen, «Speeding-up age estimation in intelligent demographics system via network optimization», 2018-May. doi: 10.1109/ICC.2018.8422409.

БАГРІЙ Р. О.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5219-1185>e-mail: bahriro@khmnu.edu.ua

ПЕТРОВСЬКИЙ С. С.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0590-0484>e-mail: petrovskijss@khmnu.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНОГО ТЕСТУВАННЯ ВЕБ-ДОДАТКІВ

У роботі проведено дослідження технології та підходів до тестування веб-додатків в сучасних фреймворках. Розглянуто основні методи ручного тестування, що потребують великого обсягу ручної праці. Особливу увагу приділено технологіям автоматизованого тестування, що пропонується застосувати при розробці сайтів в сучасних фреймворках. Детально описана піраміда тестів та рівні тестування, проаналізовані основні переваги та недоліки для кожного рівня. Запропоновано застосовувати технологію розробки на основі поведінки (BDD) для автоматизованого тестування веб-додатків. Для підвищення ефективності процесу розробки веб-додатків застосовано шаблон проектування впровадження залежностей (DI) засобами, що вбудовані у сучасних фреймворках.

Ключові слова: комп'ютерні науки, тестування, фреймворк, веб-додатки

Ruslan BAHRII, Serhii PETROVSKYI

Khmelnitskyi National University

FEATURES OF MODERN WEB APPLICATION TESTING

This paper investigates the technology and approaches to testing web applications in modern frameworks. The main techniques of manual testing, which require a large amount of manual work, are considered. The disadvantages of implementing the black-box testing method include the development of a formal specification, and the application of the white-box testing method requires analysis of software code.

Particular attention is given to automated testing technologies, which are proposed to be used to develop sites in modern frameworks. The Test pyramid and test levels are described in detail, and the main advantages and disadvantages of each level are analyzed. At the first level, a set of tests consists of unit tests that verify that an individual unit is working correctly according to the requirements of the specification. At the second level of the automation pyramid - integration tests check the interaction of a fragment of code with external components. At the third level - end-to-end tests perform testing of various user scenarios, and UI tests check the correct operation of the web application interface.

It is proposed to use behavioral development technology (BDD) for automated testing of web applications. BDD focuses on studying problems formulated based on customer stories and the construction of logic and tests based on these problems. BDD tests are best worked for integration testing, which involves testing different user scenarios.

A dependency injection (DI) design template has been used to improve the efficiency of the web application development process, with tools built into modern frameworks. This template applies the transfer of dependencies to an external, specially designed software component. Dependence is injected using a special IoC container.

Keywords: computer science, testing, framework, web applications

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На даний час веб-додатки найбільш часто використовуються для надання послуг та продажу товарів в мережі Інтернет. Помилки, допущені у додатку, можуть завдати не тільки серйозного удару по репутації компанії, але й коштувати їй чималі гроші.

В той же час, тестування веб-додатків є складним та трудомістким завданням. Основна складність тестування полягає в тому, що розробка веб-додатків передбачає поєднання архітектурно складних і неоднорідних програмних фреймворків для клієнтської та серверної частини проекту. Особливості тестування веб-додатків також полягають у тому, що, зазвичай, сторінки динамічно змінюються та мають безліч станів в залежності від запитів користувача. Також нерівномірне навантаження на веб-додаток може викликати збої у роботі.

Аналіз досліджень та публікацій

Тестування веб-додатку – це останній та обов'язковий етап технічної розробки програмного продукту. Він є важливим етапом процесі створення додатку, оскільки від якості тестування залежить подальший життєвий цикл додатку. Помилки на етапі тестування помилки призводять до додаткових витрат часу та ресурсів. Веб-додаток, який має помилки, викликає негатив у користувачів і, як наслідок, їх втрату. Як результат, замовник веб-додатку змушений платити за доопрацювання (а іноді за повторну розробку веб-додатку), а для розробників веб-додатку це втрата репутації.

Всі методи тестування веб-додатків, як і будь-якого іншого програмного продукту, поділяються на дві групи. До першої групи належать методи функціонального тестування або тестування методом «чорної скриньки» (black-box (BB)), при якому перевіряється лише зовнішня поведінка програми без аналізу

програмного коду. До другої групи належать методи структурного тестування, або тестування методом «скляного ящика» (white-box (WB)), у якому перевіряються умови розгалуження, цикли та інші атрибути програмного коду. Прикладом тестування методом ВВ є система, в якій перевіряється відповідність реалізації веб-додатку специфікації. Генерація тестів у цій системі базується на формальному описі специфікації та моделюванні поведінки програми [1].

Застосування цих методів тестування пов'язане з великим обсягом ручної праці. Так, при реалізації методів тестування ВВ потрібно розробити формальну специфікацію, а за реалізації методів тестування WB необхідний аналіз програмного коду. Тому розробники тестів для веб-додатків прагнуть якнайбільше розширити сферу автоматичної генерації тестів.

Формулювання цілей

Дослідити та визначити проблеми автоматизованого тестування веб-додатків в сучасних фреймворках та запропонувати методи та підходи для їх вирішення.

Виклад основного матеріалу

Автоматизація та піраміда тестів

Автоматизація тестів дозволяє знайти помилки веб-додатку практично відразу після написання коду. Це дає можливість реалізувати швидку розробку веб-додатку при мінімальних затратах ресурсів на його тестування.

Для організації автоматичних тестів використовується концепція піраміди тестів Майка Кона: (Рис. 1):

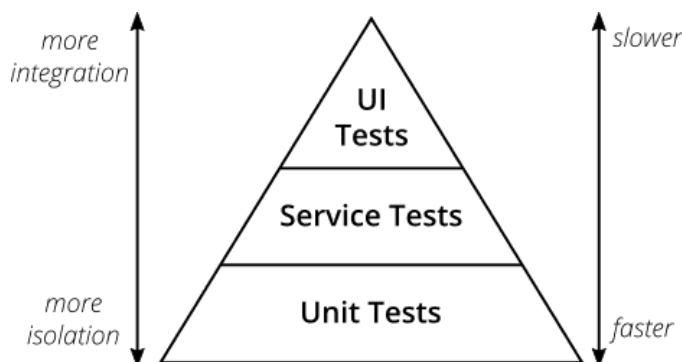


Рис. 1. Піраміда тестів Майка Кона [2]

Піраміда тестів складається з трьох рівнів: юніт-тести, сервісні тести (API тестування) та тести інтерфейсу користувача. При цьому швидкість виконання тестів та ізолюваність об'єктів, що тестуються зменшується знизу вгору (від юніт - до тестів інтерфейсу користувача).

Для правильної організації тестування необхідно дотримуватись форми піраміди – розробити достатню кількість не великих за об'ємом та швидких у виконанні юніт-тестів, декілька загальних тестів та обмежену кількість високорівневих наскрізних тестів, які перевіряють програму від початку до кінця.

Розглянемо ці рівні тестування більш детально.

1. Юніт-тести.

Основний набір тестів повинен складатися із юніт-тестів (модульних тестів). Вони перевіряють, чи окремий юніт (тестований об'єкт) працює належним чином відповідно до вимог специфікації. Кількість юніт-тестів у наборі повинна перевищувати кількість інших тестів.

Для тестування функцій виконується їх виклик з різними параметрами та з контролем очікуваних значень, що повертаються. Для об'єктно-орієнтованого підходу юнітом може бути метод чи цілий клас. Також під юніт-тестом можна розуміти фрагмент коду, який можна протестувати ізолювано від інших частин коду.

Сучасні мови програмування та фреймворки дозволяють ізолювати частину коду, що тестується, за допомогою контрольованої імітації цілих частин створюваного програмного продукту. Виклики класів замінюються на імітації (mocks) або заглушки (stubs). Реальний об'єкт (наприклад, клас, модуль чи функція) імітується створеною копією. Копія має вигляд і діє як оригінал (дає такі ж відповіді на ті ж таки виклики методів), але це заздалегідь встановлені відповіді, які визначає розробник тестів для юніт-тесту. Для підтримки високої швидкості тестування юніт-тестів необхідно забезпечити відсутність контактів з БД, файловою системою та HTTP-запитами.

Однією з вимог для юніт-тестів є перевірка всіх нетривіальних розгалужень коду, включаючи сценарій за замовчуванням та пограничні ситуації. При цьому виникає проблема у випадку рефакторингу коду – зміна внутрішньої структури коду без зміни зовнішньої поведінки. Таким чином втрачається важлива перевага юніт-тестів: діяти як система безпеки для змін коду. Для того, щоб уникнути цієї проблеми необхідно не відображати у модульних тестуваннях внутрішню структуру коду, а проводити тестування поведінки, що спостерігається.

Структура модульних тестів складається з трьох дій - Arrange-Act-Assert [3]:

- Arrange – налаштування тестових даних;
- Act – виклик методу, що тестується;
- Assert – перевірка очікуваних результатів, що повертаються.

2. Інтеграційні тести

Модульні тести перевіряють невеликі фрагменти коду. Однак, щоб перевірити, як цей код взаємодіє з іншим кодом, необхідно запустити інтеграційні тести. По суті, це тести, які перевіряють взаємодію фрагмента коду із зовнішніми компонентами (базою даних, файловою системою).

Інтеграційні тести є другим рівнем піраміди автоматизації тестування. Це означає, що його не слід виконувати так часто, як модульні тести. По суті, вони перевіряють, як функція взаємодіє із зовнішніми залежностями. Незалежно від того, чи це виклик бази даних чи веб-служби, додаток має ефективно спілкуватися та отримувати потрібну інформацію, щоб функціонувати належним чином.

Оскільки інтеграційні тести передбачають взаємодію із зовнішніми службами, вони виконуються повільніше, ніж модульні тести.

3. Наскрізні тести / Тести UI

На вершині піраміди знаходяться наскрізні тести. Вони гарантують, що весь додаток працює належним чином. Наскрізні тести виконуються найдовше, оскільки їм доводиться тестувати велику різноманітність сценаріїв користувача. Як і інтеграційні тести, ці тести також можуть вимагати від додатку зв'язку із зовнішніми залежностями.

Тестування програми від початку до кінця часто означає проходження через інтерфейс користувача.

Тести UI перевіряють правильність роботи інтерфейсу додатку. Дія користувача повинна ініціювати правильні події, дані повинні відобразитися користувачеві, стан UI має змінюватися очікуваним чином.

У веб-інтерфейсах бажано перевірити кілька аспектів UI: поведінку, верстку, юзабіліті, дотримання фірмового стилю та ін.

Тестування поведінки UI досить просте, так як потребує натиснення відповідних кнопок та введення даних. Сучасні фреймворки для односторінкових додатків (react, vue.js, Angular та інші) мають інструменти та хелпери для ретельного тестування цих взаємодій на досить низькому рівні (в юніт-тесті). Для більш традиційного додатку з рендерингом на стороні сервера застосовуються тести на основі Selenium [3].

Цілісність верстки веб-програми перевірити складніше. Залежно від програми та потреб користувачів виникає необхідність перевірити, що зміни коду випадково не порушують верстку сайту.

Для перевірки зручності використання та дизайну застосовуються тестування юзабіліті.

Чим складніший UI, тим менш надійними стають тести. Помилки у браузері, проблеми із синхронізацією, анімація та несподівані спливаючі діалоги – характерні причини, які вимагають багато часу на налагодження тестів.

Підходи до тестування

До сучасних технологій та підходів до тестування відносяться такі як: розробка через тестування (англ. Test Drive Development, TDD) та розробка на основі поведінки (англ. Behavior Driven Development, BDD).

Розробка через тестування (TDD) це технологія розробки програмного забезпечення, що починається з попереднього написання тестів, а потім пишеться код, що має проходити цей тест. Після цього виконується рефакторинг (покращення якості) коду до прийнятого стандарту (рис. 2) [4].

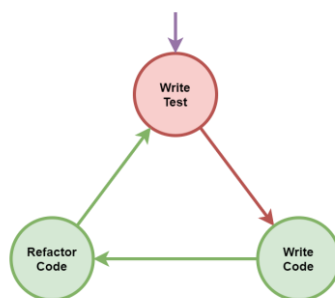


Рис. 2. Цикл тестування TDD

Розробка на основі поведінки (BDD) – це варіація розробки через тестування, яка дозволяє створювати якісніше програмне забезпечення та розробляти тест-кейси при тестуванні додатків відповідно до вимог замовника. В BDD основна увага приділяється дослідженню задач, що сформульовані на основі слів замовником та побудові логіки та тестів на основі цих задач [5].

Процес розробки проходить три етапи – *Discovery*: дослідження проблеми клієнта та можливість її вирішення, *Formulation*: формулювання прийнятих задач у вигляді бізнес-специфікації та *Automation*: автоматизація – створення відповідних автоматизованих тестів (рис. 3).

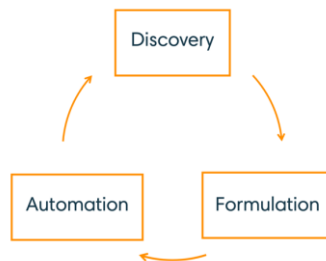


Рис. 3. Етапи BDD-процесу

Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки при автоматизованому тестуванні програмного забезпечення. Підхід TDD є сенс застосовувати для юніт-тестування, тобто, для перевірки роботи окремих функцій. Тоді як BDD – для інтеграційного тестування, тобто для перевірки, як окремі модулі працюють один з одним, що передбачає тестування різних сценаріїв користувача;

Впровадження залежності

Впровадження залежності для веб-розробки є один з найкращих патернів проектування, що дозволяє зробити програмний код більш читабельним та тестованим.

Впровадження залежності (англ. Dependency injection, DI) – шаблон проектування програмного забезпечення, що передбачає передачу залежностей зовнішньому, спеціально призначеному для цього програмному компоненту [6].

Залежність у програмуванні краще показати на прикладі. Коли клас А використовує деяку функціональність класу В, тоді кажуть, що клас А залежить від класу В. Для використання методів інших класів, потрібно спочатку створити екземпляр цього класу, тобто клас А повинен створити екземпляр класу В. Таким чином, передача іншому програмному компоненту задачі створення об'єкта та подальше використання цієї залежності називається впровадженням залежностей.

Наприклад є клас ClassA, який містить екземпляр класу ClassB:

```

class ClassA {
    var classB: ClassB
}
class ClassB {
}
  
```

Без впровадження залежності ClassA може створювати залежні екземпляри класів при необхідності. Це зручно при програмуванні, але є багато недоліків. Так, ClassA та ClassB тісно пов'язані – замінити ClassB на інший немає можливості. Це не дозволяє провести модульне тестування ClassA, так як немає можливості ізолювати один клас від іншого.

Один з можливих шляхів вирішення проблеми є визначення всіх необхідних йому залежностей всередині конструктора та передачу відповідальності за створення залежних класів зовнішньому програмному компоненту:

```

class ClassA {
    var classB: ClassB
    constructor(classB: ClassB){
        this.classB = classB
    }
}
  
```

В такому випадку ClassA та ClassB пов'язані слабо і є можливість підмінити ClassB заглушкою та провести модульне тестування ClassA. До недоліків слід віднести підвищену складність коду, особливо при великій глибині залежних класів.

Сучасні фреймворки дозволяють застосувати механізм впровадження залежності та дозволяють визначити, як потрібно надати кожну залежність. Ін'єкція залежностей відбувається за допомогою IoC контейнера, який постачається разом із фреймворком.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проаналізовано наявні проблеми автоматизованого тестування веб-додатків в сучасних фреймворках. Виявлені проблеми, що виникають при тестуванні веб-додатків на різних рівнях тестування. Запропоновано застосовувати технологію розробки на основі поведінки (BDD) для автоматизованого тестування веб-додатків, що дозволяє проаналізувати вимоги замовника та побудувати логіку та тести відповідно до сформульованих вимог. Для підвищення ефективності процесу розробки веб-додатків запропоновано використати шаблон проектування впровадження залежностей (DI) засобами, що вбудовані у сучасних фреймворках.

Література

1. Van Veenendaal, Graham D., Rex B. Foundations of Software Testing: ISTQB Certification. 2019. 288 p.
2. Ham V. The Practical Test Pyramid. 2018. URL: <https://martinfowler.com/articles/practical-test-pyramid.html>.
3. Research Anthology on Agile Software, Software Development, and Testing. Information Resources Management Association. IGI Global, 2021. 2250 p.
4. BDD vs TDD vs ATDD: Key Differences. URL: <https://www.browserstack.com/guide/tdd-vs-bdd-vs-atdd>.
5. Behavior Drive Development (BDD) and Functional Testing. URL: <https://medium.com/javascript-scene/behavior-driven-development-bdd-and-functional-testing-62084ad7f1f2>.
6. Bojkić, Pržulj, Stefanović, Ristic. Usage of Dependency Injection within different frameworks. Conference: 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA At: Sarajevo. 2020. P. 119–124.

КИРИЦЯ І. Ю.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8280-5552>e-mail: kyrytsya@vntu.edu.ua

ФЕНОМЕНОЛОГІЧНІ КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ

В роботі виконано огляд відомих критеріїв деформовності, які отримали поширення для оцінки ймовірності руйнування як при монотонній, так і при немонотонній пластичній деформації.

Найбільшого застосування набули методи оцінки пластичності, в яких залежність пластичності від схеми напруженого стану описується діаграмами пластичності. Діаграма пластичності являє собою експериментальну залежність граничної деформації від показника жорсткості напруженого стану. В більшості робіт ця залежність представлена плоскою кривою.

Загальним недоліком відомих критеріїв деформовності є те, що вплив схеми напруженого стану на пластичність описується діаграмою пластичності, а вплив історії навантаження – плоскими траєкторіями.

Ключові слова: теорія деформовності, критерій деформовності (руйнування), використаний ресурс пластичності, гранична деформація, напружений стан, обробка тиском, пластична деформація.

Inna KYRYTSYA

Vinnytsia national technical University

PHENOMENOLOGICAL CRITERIA OF DESTRUCTION

The paper reviews the known deformability criteria, which have become widespread to assess the probability of failure in both monotonic and nonmonotonic plastic deformation.

The most widely used methods of assessing plasticity, in which the dependence of plasticity on the stress state scheme is described by plasticity diagrams. The plasticity diagram is an experimental dependence of the ultimate deformation on the stiffness index of the stress state. In most works, this dependence is represented by a flat curve.

The plasticity of metals depends on many factors, namely the nature of the metal and the thermomechanical parameters of the process. With cold plastic deformation, the main factor influencing plasticity is the stress state and the law of its change during loading.

To quantify the impact of stress state on the probability of failure using failure criteria. Under the destruction is understood the appearance of macrocracks, which leads to irreparable damage to the product.

A common disadvantage of the known deformation criteria, which are common to assess the probability of failure in both monotonic and nonmonotonic plastic deformation is that the subintegral functions of these criteria are based on the hypothesis that the effect of stress state on plasticity is described by the plasticity diagram and the influence of load history - flat trajectories.

Due to the fact that the plasticity diagrams cover a rather narrow class of stress states, in applied theories of deformability there is no single approach to estimating the value of the used plasticity resource in the processes of metal forming.

From the performed research it follows that at present there are almost very few works in which the dependence of plasticity on the history of loading is described by spatial trajectories. Therefore, the question of the destruction criteria remains open and relevant.

Keywords: deformability theory, deformability criterion (destruction criterion), used plasticity resource, ultimate deformation, stress state, pressure treatment, plastic deformation.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Методи оцінки деформовності заготовок в процесах обробки тиском базуються на феноменологічній теорії деформовності, перевага якої перед іншими теоріями руйнування полягає в тому, що вона враховує вплив історії навантаження на інтенсивність накопичення пошкоджень. Теорія деформовності дозволяє також одержати кількісну оцінку впливу параметрів технологічного процесу на ймовірність руйнування і, на основі цього, раціонально використати резерви пластичності.

Пластичність металів залежить від багатьох факторів, а саме: від природи металу та термомеханічних параметрів процесу. При холодній пластичній деформації основним фактором, який впливає на пластичність, є напружений стан і закон його зміни в процесі навантаження.

Для кількісної оцінки впливу напруженого стану на ймовірність руйнування використовують **критерій руйнування**. Під руйнуванням будемо розуміти появу макротріщини, яка приводить до непоправного браку виробу.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є проведення аналізу відомих критеріїв деформовності (руйнування), які отримали поширення для оцінки ймовірності руйнування як при монотонній, так і при немонотонній пластичній деформації, визначення переваг та недоліків існуючих критеріїв та особливостей їх застосування.

Виклад основного матеріалу

В класичних теоріях міцності для оцінки граничного стану використовують, в основному, критерії руйнування, в яких накладаються обмеження на напруження. Таким є, наприклад, критерій Шлейхера-Надаї, згідно якого інтенсивність дотичних напружень T при руйнуванні є визначеною для даного матеріалу функцією середнього напруження σ

$$T = f(\sigma) \quad (1)$$

Якщо виходити із гіпотези єдиної кривої течії в координатах $\sigma_u - e_u$, то із умови (1) витікає, що гранична деформація e_p для даного матеріалу не залежить від історії навантаження. З фізичної точки зору перевага критерію (1) в тому, що він враховує подвійний характер руйнування, оскільки одночасно враховується вплив інваріантів дотичних і нормальних напружень. В залежності від виду функції $f(\sigma)$ можна отримати різні формули граничних поверхонь, які більш достовірно описують ймовірність руйнування.

Близьким є підхід Давіденкова-Фрідмана, в якому враховується експериментально установлений факт, що в залежності від умов навантаження один і той же матеріал може руйнуватися і шляхом відриву, і шляхом зсуву. Тобто при фіксованій температурі і швидкості навантаження руйнування має двоїстий характер. Самий простий спосіб врахування такої двоїстості полягає в одночасному врахуванні дотичних і нормальних напружень. Я. Б. Фрідман з цією метою вводить показник

$$\alpha_1 = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}^{\text{прив.}}}, \quad (2)$$

де τ_{\max} – максимальне дотичне напруження;

$\sigma_{\max}^{\text{прив.}}$ – максимальне значення приведенного нормального напруження розтягу, вирахованого по другій теорії міцності.

Тому формулу (2) можна переписати у вигляді

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_1 - 2\mu(\sigma_2 + \sigma_3)},$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

Недоліком цього підходу є те, що показник α_1 неоднозначно описує напружений стан, крім того, теорія Я. Б. Фрідмана не враховує вплив історії навантаження на пластичність.

Останнім часом розвиваються критерії руйнування, в яких накладаються обмеження на деформації. Наприклад, для формулювання умови локального руйнування у вершині тріщини використано двопараметричний критерій руйнування. Відповідно умова локального руйнування у вершині тріщини має вид

$$\varepsilon_{\alpha,\beta}(r) = \left(\chi + \frac{1-\chi}{m} \right)^{-\frac{1}{n}} = e_p \quad \text{при } r = \rho_c \quad (3)$$

де $m = \left[(1 + \alpha + \beta)^2 - 3(\alpha + \beta + \alpha\beta)^{\frac{1}{2}} \right]$

n – показник степені деформаційного зміцнення,

$$\alpha = \sigma_2/\sigma_1, \quad \beta = \sigma_3/\sigma_1,$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження в межах пластичної зони перед тріщиною,

χ – стала, яка враховує величину крихкості матеріалу,

ρ_c – відстань від вершини тріщини.

Для крихкого матеріалу ρ_c може корелювати з розміром зерна, відстанню між ферітними прошарками, неметалевими включеннями і ін. При в'язкому руйнуванні величина ρ_c може бути пов'язана з відстанню між порами або включеннями.

Таким чином критерій (3) враховує вид напруженого стану в вершині тріщини, інтенсивність зміцнення, крихкість матеріалу. В критерії (3) практично не враховується вплив законів зміни показників напруженого стану α і β на величину граничної деформації e_p .

Близьким є підхід Г. А. Смірнова-Аляєва

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)}, \quad (4)$$

де ψ – використаний ресурс пластичності, який при деформуванні без руйнування менше одиниці. При руйнуванні $\psi = 1$,

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau \quad \text{– ступінь деформації,}$$

$e_p(\eta)$ – діаграма пластичності.

При оцінці величини граничної деформації за критерієм (4) історія деформування не враховується, а граничну деформацію e_p , при якій має місце руйнування, визначають по діаграмі пластичності $e_p(\eta)$ за відомим значенням η . Такий підхід в окремих випадках може привести до значних похибок, до 30% і більше.

Критерій руйнування В. Л. Колмогорова має більш фундаментальне фізичне обґрунтування. При його розробці використано гіпотезу про пропорційну залежність між інтенсивністю накопичення пошкоджень і приростом ступені деформації. Дана гіпотеза запропонована В. В. Новожиловим і отримала експериментальне підтвердження для монотонного навантаження. Умова руйнування по В. Л. Колмогорову записується в вигляді

$$\psi = \int_0^{t_p} B(\tau) \frac{\dot{\epsilon}_u}{e_p(\eta(\tau))} d\tau = 1, \quad (5)$$

де $B(\tau)$ – величина, яка описує швидкість розвитку тріщин і їх заліковування при холодній пластичній деформації.

Використання критерію В. Л. Колмогорова в формі (5) практично неможливе, так як в літературі не приводяться дані про коефіцієнт $B(\tau)$. Тому цей коефіцієнт приймають рівним одиниці. Тоді при простому навантаженні ($\eta = \text{const}$) критерій (5) співпадає з (4). Необхідно також відмітити, що критерій (5) аналогічний критерію А. А. Ільюшина

$$\int_0^{t_p} \frac{d\tau}{t_r(\sigma(\tau))} = 1, \quad (6)$$

де $t_r(\sigma)$ – час руйнування зразка в умовах повзучості (при сталому напруженні σ),
 t_p – час деформування до руйнування.

Критерій (6) побудований на основі гіпотези про справедливості лінійного закону накопичення пошкоджень при повзучості і не враховує впливу історії навантаження на інтенсивність накопичення пошкоджень.

Г. Д. Дель, В. А. Огородніков і В. Г. Нахайчук, виходячи із гіпотези про нелінійний закон накопичення пошкоджень при пластичній деформації одержали критерій руйнування

$$\psi = \int_0^{e_p} n \frac{e_u^{n-1}}{e_p(\eta)^n} de_u = 1, \quad (7)$$

$$\text{де } n = 1 + a \frac{d\eta}{de_u}. \quad (8)$$

Константа a для досліджених матеріалів виявилась рівною 0,2.

Експериментальна перевірка показала, що для шляхів деформування середньої і великої кривизни критерій (7) практично непридатний. Тому залежність (8) була уточнена В. А. Огородніковим і рівняння (8) замінено наступним [1]

$$n = 1 + a \cdot \arctg \frac{d\eta}{de_u}. \quad (9)$$

Критерій (7) враховує вплив історії навантаження, а також нелінійність залежності між приростом ступені деформації e_u і густиною пошкоджень. При $\eta = \text{const}$ ($d\eta/de_u = 0$), критерій (7) співпадає з (5) і розрахунки граничних деформацій дають однакові результати. Для складних навантажень похибка при розрахунках по критерію (5) перевищує 20%. Тому при складному монотонному навантаженні для оцінки ймовірності руйнування необхідно надати перевагу критерію (7).

Теорія деформовності, в основу якої покладена модель накопичення пошкоджень відповідно до критерію (7), отримала подальший розвиток в роботах О. О. Розенберга, присвячених оптимізації процесів деформуючого протягування та комбінованих процесів протяжки зі згином трубних заготовок. Використання гіпотез, покладених в основу критерію (7), виправдано, так як в більшості схем формозмінення має місце плоский напружений стан, тому вплив об'ємності напруженого стану незначний.

У випадку немонотонного навантаження механізм накопичення і заліковування дефектів суттєво змінюється. Розглянуті вище критерії не враховують особливостей процесу накопичення пошкоджень при немонотонній деформації і не можуть бути використані для оцінки пластичності в процесах з немонотонним

навантаженням.

Для кількісної оцінки впливу немонотонної деформації на пластичність С. Менсон виходячи із результатів експериментальних досліджень, запропонував рівняння, яке описує залежність між числом циклів N і розмахом (амплітудою) пластичної деформації в циклі Δe_u

$$\Delta e_u N^a = c, \quad (10)$$

де a, c – сталі, які залежать від властивостей матеріалу.

Вважаючи, що інтенсивність пластичного розсіювання на будь-якому етапі знакозмінної деформації не залежить від попередньої деформації А. А. Богатов запропонував використаний за n етапів знакозмінного деформування ресурс пластичності визначати підсумовуванням. При цьому на кожному i -му етапі використаний запас пластичності визначається формулою

$$\psi = \sum_{i=1}^n \int_0^{e_{ui}} \frac{a e_u^{a-1}}{e_p^a} de_u. \quad (11)$$

Підінтегральний вираз в (11) отримано раніше Г. Д. Делем та В. А. Огородніковим, виходячи із уявлень про степеневу залежність між накопиченою пластичною деформацією і пластичним розсіюванням. Величина a залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і умов деформування. Для жорстких схем напруженого стану $a = 3$, а при усебічному стиску a наближається до одиниці.

В умові (11) за межу пластичності прийнята скалярна величина, тому ця умова не враховує направленої характеру пошкоджень і не описує анізотропію пластичності деформованого металу, із умови не впливає здатність тіл, зруйнованих при одному напруженому стані (наприклад, при розтягу), підлягати наступним значним деформаціям при іншому напруженому стані (наприклад, при стиску). Крім того, при знакозмінному навантаженні умова (11) не враховує впливу величин амплітуд деформацій, що безумовно призведе до помилок при розрахунках використаного ресурсу пластичності.

В зв'язку з цим, останнім часом набула розвитку тензорна модель накопичення пошкоджень при немонотонній деформації. Так як пошкодження є функціоналами трьохмірних тензорів напружень, то вони можуть бути тільки трьохмірними тензорами або сукупністю тензорів деяких порядків. Найпростіший варіант теорії накопичення пошкоджень макрочастинки будується в припущенні, що процес накопичення пошкоджень описується симетричним тензором другого рангу. Ідея О. А. Ільюшина отримала розвиток в роботах Г. Д. Деля, І. А. Кийко, А. А. Мішуліна і В. М. Михалевича. В якості міри пошкоджень в названих роботах прийнято другий інваріант девіатора пошкоджень ψ_{ij} , який будується як функціонал, що залежить від тензора приращень деформацій, схеми напруженого стану і фізико-механічних властивостей матеріалу.

Г. Д. Дель, вважає, що руйнування з'являється тоді, коли деяка функція інваріантів тензора ψ_{ij} досягає певного визначеного значення. Перший інваріант цього тензора дорівнює нулю. Нехтуючи впливом третього інваріанта, Г. Д. Дель записав умову руйнування у вигляді [2]

$$\psi_{ij} \psi_{ij} = 1. \quad (12)$$

Г. Д. Дель розробив тензорно-лінійну модель накопичення пошкоджень, згідно якої компоненти тензора пошкоджень визначаються формулою [3, 4]

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu) \beta_{ij} de_u, \quad (13)$$

де $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}$ – компоненти направляючого тензора приращень деформацій,

$F(e_u, \eta, \mu)$ – функція, яка визначається механічними властивостями матеріалу, $F = \frac{d\varphi}{de_u}$, а

функція φ вибрана у вигляді

$$\varphi = (1-a) \frac{e_u}{e_p} + a \left(\frac{e_u}{e_p} \right)^2, \quad (14)$$

де a коефіцієнт прийнятий рівним 0,5.

А. А. Мишуліним і В. М. Михалевичем розроблена тензорно-нелінійна модель накопичення пошкоджень, яка являється узагальненням розглянутого вище варіанту лінійної моделі. Виходячи із

загального зв'язку між двома тензорами, розглянутого О. А. Ільюшиним, в роботі одержано наступний вираз для компонент девіатора пошкоджень

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} \left(A\beta_{ij} + B \left(\beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right) \right) de_u, \quad (15)$$

де A і B деякі функції.

Якщо в межах окремих етапів деформація являється простою ($\beta_{ij} = \text{const}$), вираз (15) перетворюється до виду

$$\psi_{ij} = a\beta_{ij} + b \left(\beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right), \quad (16)$$

де a і b – первісні функцій A і B , які виражаються через монотонно зростаючу функцію накопичення пошкоджень

$$\varphi = (1 - c) \frac{e_u}{e_p} + c \left(\frac{e_u}{e_p} \right)^2. \quad (17)$$

Особливістю розглянутих вище методів є те, що в основу критеріїв ((4),(5),(7),(11)) покладена гіпотеза про те, що залежність пластичності металів від схеми напруженого стану описується діаграмою пластичності $e_p(\eta)$. Такий же недолік характерний і для критеріїв, які описують немонотонне деформування, так як для апроксимацій функцій пошкоджень, які є первісними підінтегральних виразів в критеріях (13),(15), також використана діаграма пластичності (14), (17).

Із результатів досліджень останніх років витікає, що при об'ємному напруженому стані, а також в деяких випадках плоского напруженого стану, значення граничної деформації e_p виявляються різними для схем, які характеризуються одним і тим же значенням показника напруженого стану η .

Більшість дослідників вважають, що для характеристики експериментальної залежності пластичності від напруженого стану необхідно використовувати не менше двох показників напруженого стану.

В. А. Огородніков [1] вперше висунув гіпотезу про те, що на пластичність впливає третій інваріант тензора напружень $I_3(T_\sigma)$. Для кількісної оцінки цього впливу ним введено показник напруженого стану, який характеризує залежність пластичності від третього інваріанта тензора напружень і відрізняється від нуля тільки при об'ємному напруженому стані, що підтверджено в роботі [5]

$$\chi = \frac{\sqrt{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}. \quad (18)$$

В роботі [6] запропоновано будувати діаграми пластичності в координатах $e_p - \eta - \chi$, а значення граничних накопичених деформацій розраховувати за допомогою критерію, що враховує вплив інваріантів тензора і девіаторів напружень:

$$\psi = \int_0^{e^*} (1 + f) \frac{e_u^f de_u}{e_p^* [\eta(e_u)]^{1+f}} \leq 1, \quad (19)$$

де $f = 0.2 \arctg \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)$, а $\frac{d\eta}{de_u}$ і $\frac{d\chi}{de_u}$ – швидкості їх зміни.

В роботах рекомендують в якості другого показника напруженого стану використовувати параметр Надаї-Лоде по напруженнях μ_σ . Експериментальні залежності e_p від η при фіксованих значеннях μ_σ одержані А. А. Богатовим, С. В. Смірновим, а також Ю. Б. Важенцевим, В. В. Ісаєвим. Гранична деформація e_p при об'ємному напруженому стані залежить від двох показників η і μ_σ .

Існує характерний недолік і для критеріїв, які описують немонотонне навантаження (13),(15), оскільки апроксимуючі функції (первісні підінтегральних функціоналів в критеріях (14),(17)) базуються на діаграмі пластичності. Це зумовлено тим, що явної залежності накопиченої до моменту руйнування деформації e_p від показників η і μ_σ або інших еквівалентних їм безрозмірних характеристик напруженого стану в даний час не одержано.

Проте, І. О. Сиваком в роботі [7, 8] було запропоновано проводити оцінку використаного ресурсу пластичності ψ за формулою

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (20)$$

де $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхня граничних деформацій.

Використання поверхонь граничних деформацій для оцінки використаного ресурсу пластичності дозволило врахувати об'ємність схеми напруженого стану.

Феноменологічний підхід створює перспективи щодо побудови діаграми пластичності з використанням нового показника напруженого стану, запропонованого О. В. Грушко [9]. Даний показник використовується в якості аргументу діаграми пластичності

$$\xi = \frac{k_1\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3}{\sigma_i} = k_1a_1 + k_2a_2 + k_3a_3 \quad (21)$$

де $a_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$, $a_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$, $a_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_i}$ – відносні головні напруження, k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти впливу

відносного головного напруження на пластичність металу.

Встановлено, що вплив головних нормальних напружень є неоднаковим щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу, що дає можливість формування моделі пластичності, зокрема для матеріалів з різною реологією.

Діаграма пластичності $e_p(\xi)$ описується експоненціальними функціями і має суттєво кращу

кореляцію з експериментом, ніж традиційна діаграма пластичності $e_p(\eta)$.

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \xi) = d \cdot \exp\left(-q \cdot (a_1 + \bar{k}_2 a_2 + \bar{k}_3 a_3)\right), \quad (22)$$

де $\bar{k}_2 = \frac{k_2}{k_1}$, $\bar{k}_3 = \frac{k_3}{k_1}$ – коефіцієнти впливу відносного головного напруження, які виражені в

частках стосовно коефіцієнта k_1 першого головного напруження a_1 .

Незручність використання показника ξ полягає в його унікальності для кожного матеріалу, що робить неможливим порівняння діаграм $e_p(\xi)$ для різних металів на одному рисунку, на відміну від звичайної діаграми пластичності.

В основі сучасної теорії деформовності лежить гіпотеза про залежність пластичності від схеми напруженого стану, яка описується діаграмою пластичності. Діаграми пластичності в більшості теорій описують експериментальну залежність граничної деформації від показника жорсткості напруженого стану. Однак в останніх роботах В. А. Огороднікова, А. А. Богатова, Ю. Г. Важенцева, С. В. Смірнова показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану характеризується, як мінімум, двома показниками напруженого стану. В. А. Огородніков вважав, що при об'ємному напруженому стані необхідно враховувати вплив на пластичність третього інваріанта тензора напружень. Такий підхід дозволив отримати позитивні результати при розробці ряду процесів обробки тиском, які реалізуються в умовах об'ємного напруженого стану.

Для оцінки деформовності заготовок і для технологічного забезпечення якості готових виробів необхідна інформація про історію деформування кожної матеріальної частинки в об'ємі заготовки.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Загальним недоліком відомих критеріїв деформовності, які отримали поширення для оцінки ймовірності руйнування як при монотонній, так і при немонотонній пластичній деформації є те, що підінтегральні функції цих критеріїв базуються на гіпотезі про те, що вплив схеми напруженого стану на пластичність описується діаграмою пластичності, а вплив історії навантаження – плоскими траєкторіями.

В зв'язку з тим, що діаграми пластичності охоплюють досить вузький клас напружених станів, в прикладних теоріях деформовності відсутній єдиний підхід до оцінки величини використаного ресурсу пластичності в процесах обробки металів тиском.

З приведення вище огляду виконаних досліджень випливає, що в даний час практично дуже мало робіт, в яких залежність пластичності від історії навантаження описується просторовими траєкторіями. Тому питання про критерії руйнування залишається відкритим та актуальним.

Література

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 175 с.
2. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.

3. Del G. D. Plasticity of metal subjected to complex loading / Del G. D., Ogorodnikov V. A., Spiridonov L. K. // *Izv. Uchebn. Zaved. «Mashinostr.»*. – 1974. – № 12. – P. 22–26.
4. Dell H. Crach FEM–A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – V. 908, May 17. – P. 165–170.
5. Огородніков В. А. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором : [монографія] / В. А. Огородніков, І. Ю. Кириця, В. Є. Перлов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 164 с.
6. Огородников В. А. Энергия. Деформация. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : [монография] / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – В. : УНИВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 204 с.
7. Сивак И. О. Поверхность предельной пластичности / И. О. Сивак // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 9–15.
8. Сивак И. О. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / И. О. Сивак, К. И. Коцюбинская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2007. – С. 74–76.
9. Грушко А.В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монография / А. В. Грушко. – Винница : ВНТУ, 2015. – 348 с.

References

1. Ogorodnikov V. A. Ocenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem / V. A. Ogorodnikov. – K. : Vishha shkola. Golovnoe izd-vo, 1983. – 175 s.
2. Del' G.D. Tehnologicheskaja mehanika / G. D. Del'. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 174 s.
3. Del G. D. Plasticity of metal subjected to complex loading / Del G. D., Ogorodnikov V. A., Spiridonov L. K. // *Izv. Uchebn. Zaved. «Mashinostr.»*. – 1974. – № 12. – P. 22–26.
4. Dell H. Crach FEM–A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – V. 908, May 17. – P. 165–170..
5. Ogorodnikov V. A. Mekhanika protsesiv kholodnoho plastychnoho deformuvannya visesymetrychnykh zahotovok z hlukhym otvorem : [monohrafiia] / V. A. Ogorodnikov, I. Yu. Kyrytsia, V. Ye. Perlov. – Vinnytsia : VNTU, 2015. – 164 s.
6. Ogorodnikov V. A. Jenergiia. Deformacija. Razrushenie (zadachi avtotehnicheskoi jekspertizy) : [monografija] / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiselev, I. O. Sivak. – V. : UNIVERSUM – Vinnicja, 2005. – 204 s.
7. Sivak I. O. Poverhnost' predel'noj plastichnosti / I. O. Sivak // Udoskonalennja procesiv ta obladnannja obrobki tiskom u mashinobuduvanni ta metalurgii. – Kramators'k : DDMA, 1999. – S. 9–15.
8. Sivak I. O. Plastichnost' metallov pri ob#emnom naprjazhennom sostojanii / I. O. Sivak, K. I. Kocjubivskaja // Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni : zb. nauk. prac'. – Kramators'k, 2007. – S. 74–76.
9. Grushko A.V. Karty materialov v holodnoj obrabotke davleniem : monografija / A. V. Grushko. – Vinnica : VNTU, 2015. – 348 s.

БРАЦЛАВЕЦЬ Б. С.

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3315-4837>e-mail: bratslavets368@gmail.com

ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ГАЛЬВАНІЧНИМИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ ЦИНКУ

У статті представлені технологічний процес відновлення деталей гальванічним цинкуванням із застосуванням активатора і результати експериментів у вигляді графіків залежності швидкості нанесення покриття від щільності току та швидкості руху активатора.

Ключові слова: технологія, активатор, експеримент, гальванічне цинкування, відновлення, залежність, щільність току, корозія, катодна щільність току.

Bogdan BRATSLAVETS

Vinnytsia National Agrarian University

RESTORATION OF PARTS OF AGRICULTURAL MACHINES WITH ZINC-BASED GALVANIC COATINGS

Galvanizing is most often used to protect against corrosion. In repair production zinc coverings are used for protection against corrosion of fastening details and restoration of landing surfaces of lightly loaded details. Electroplating is the process of applying metal to the surface of parts by crystallizing it from an aqueous solution of the corresponding salts (electrolyte) when a direct current passes through them. An electrical circuit is closed by an electrolyte between two conductors called electrodes. The electrode to which the conductor of the external circuit with a plus is attached is called the anode, and with a minus - the cathode. The repaired part, on which the metal is built up, serves as the cathode, and the anode - plates, copper, lead, zinc, cadmium and other metals. In electrolysis, soluble and insoluble anodes are used. In practice, soluble lead is most often used, and insoluble lead is used only for chromium plating. The preparation of the surface of the part before coating (machining, degreasing, digestion) is important for the quality of the coating. The paper identifies the advantages and disadvantages of the method of updating parts of agricultural machinery with galvanic coatings based on zinc. This makes it possible to analyze the results of experiments and evaluate the effectiveness of using this method of restoring parts.

The article presents the technological process of restoration of parts by galvanic galvanizing using an activator and the results of experiments using graphs of the dependence of the rate of coating on the current density and the speed of the activator. Determine whether the use of an experimental activator will increase the speed and quality of coating on parts.

Keywords: technology, activator, experiment, galvanic galvanizing, reduction, dependence, current density, corrosion, cathode current density.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Гальванічне покриття – це процес нанесення металу на поверхню деталей шляхом кристалізації його з водного розчину відповідних солей (електроліту) при проходженні через них постійного струму. Електричний ланцюг за допомогою електроліту замикається між двома провідниками, званими електродами. Електрод, до якого приєднаний провідник зовнішнього ланцюга з плюсом, називається анодом, і з мінусом – катодом. Ремонтована деталь, на яку здійснюється нарощування металу, служить катодом, а анодом – пластини, міді, свинцю, цинку, кадмію та інших металів. При електролізі застосовують розчинні та нерозчинні аноди. У практиці найчастіше застосовують розчинні, а нерозчинні свинцеві застосовують лише за хромування. На якість покриття важливе значення має підготовка поверхні деталі перед покриттям (механічна обробка, знежирення, травлення).

Формулювання цілей статті

Обґрунтування технологічного процесу відновлення деталей гальванічним цинкуванням із застосуванням активатора і як результат експериментів представлення у вигляді графіків залежності швидкості нанесення покриття від щільності току та швидкості руху активатора.

Виклад основного матеріалу

Цинк – метал срібно-білого кольору. Щільність цинку $7,1 \text{ г/см}^3$, температура плавлення 420°C . Цинкові покриття зазвичай бувають м'якими (500...600 МПа) та пластичними. Вони добре витримують згини, розвальцювання, але погано – запресування. Тому цинкування найчастіше застосовують для захисту від корозії. У ремонтному виробництві цинкові покриття застосовують для захисту від корозії кріпильних деталей і відновлення посадочних поверхонь малонавантажених деталей.

Відновлення деталей гальванічними покриттями мають наступні переваги перед іншими способами відновлення:

- відсутність термічного впливу на деталі, що викликає в них негативні зміни структури і механічних властивостей;
- отримання з великою точністю заданої товщини покриття, що дозволяє знизити до мінімуму припуск на послідовну механічну обробку і її трудомісткість чи й зовсім виключити її;

- осадження покриттів з заданими непостійними по товщині фізико-механічними властивостями;
- одночасне відновлення великої кількості деталей (в ванну завантажують десятки деталей), що знижує трудомісткість і собівартість одиниці виробу;
- можливість автоматизацію процесу.

Основним недоліком цинкування є мала швидкість нанесення покриття, приблизно $6 \div 15$ мкм/год.

Проведемо попередні досліді по усуненню даного недоліку.

Вирішальний вплив на швидкість нанесення покриттів впливає катодна щільність струму:

$$V = \frac{C \cdot D_k \cdot \eta_k}{1000 \cdot \gamma}, \quad (1)$$

де V – швидкість осадження покриттів, мм/год; C – електрохімічний еквівалент, г/А год; D_k – катодна щільність струму; η_k – катодний вихід металу по струму, %; γ – щільність осадженого металу, г/см³.

Оскільки C і γ – величини постійні, і η , при використанні кислого електроліту для цинкування, близький до 100%, то основний шлях підвищення швидкості осадження покриттів – збільшення катодної щільності струму.

Відомо, що суттєве збільшення катодної щільності струму можливе при перемішуванні електроліту. Однак, при збільшенні катодної щільності струму погіршується якість покриття, що наноситься:

- відбувається утворення дендритів;
- пориста поверхня нанесеного покриття (піттинг).

Для усунення цих недоліків можна використати установку з активуючим пристроєм.

Активуючий пристрій (активатор) перемішує електроліт і активує відновлювану поверхню, тим самим запобігає об'єднанню прикатодного шару електроліту і зменшує хімічну поляризацію катода, яка являється основною причиною обмеження катодної щільності струму при цинкуванні із сірчаноокислих електролітів. Виникає реальна можливість збільшення катодної щільності струму, а відповідно, і швидкості нанесення покриття.

Щітки активатора, активуючи поверхню, запобігають утворенню дендритів і явища піттингу на поверхні покриття, що наноситься на відновлювану деталь.

На малюнку 1 представлені результати експериментів у вигляді залежності швидкості нанесення покриття від швидкості руху активатора відносно відновлюваної поверхні. Нанесення покриття проходило при технологічному процесі з постійними параметрами, крім швидкості руху активатора.

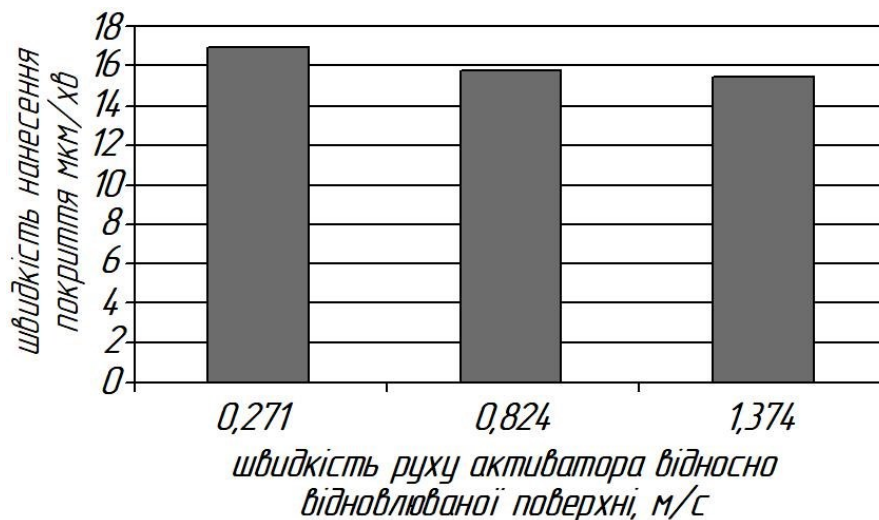


Рис. 1. Залежність швидкості нанесення покриття від швидкості руху активатора

Технологічний процес:

- механічна обробка;
- знежирення;
- трійння при щільності струму на аноді 50 А/дм², тривалість 60 с;
- нанесення покриття, при щільності струму на катоді 100 А/дм², тривалість 12 хв;
- температура електроліту 15–40 °С (в результаті досліджень було виявлено, що при зміні температури електроліту від 15 °С до 40 °С, швидкість нанесення покриття практично не змінюється);
- щільність електроліту 1,27 г/см³;
- рН=4.

Склад електроліту: 500 г/л – сірчаноокислотного цинку, 20–30 г/л – сірчаноокислотного алюмінію.

Результати і обговорення

В результаті досліджень були отримані зразки з якісним покриттям, як видно із графіка, велика швидкість нанесення цинкового покриття при швидкості руху активатора 0,271 м/с, тому наступні дослідження проводились з цією швидкістю.

Прийнявши швидкість руху активатора 0,271 м/с, були проведені дослідження про вплив зусилля прижимання щіток активатора до поверхні на швидкість нанесення покриття. В результаті було виявлено, що при меншому зусиллі прижимання щіток швидкість нанесення покриття збільшується, але погіршується якість покриття, що наноситься. Тому, для подальших досліджень було вибрано найбільш раціональне значення зусилля – 20 Н/см.

При використанні в якості щіток активатора вологостійкої плівки, на якість і швидкість нанесення покриття впливає розмір зерен абразиву. При меншій зернистості плівки якість і швидкість нанесення покриття вища.

В подальшому було досліджено вплив катодної щільності струму на швидкість нанесення покриття і їх якість. Експерименти проводились з чотирма активаторами, при зусиллі прижимання активатора 20 Н/см і його швидкості 0,271 м/с. Технологічний процес такий же, що і в попередніх експериментах. Результати представлені у вигляді залежності швидкості нанесення покриття від щільності струму на рисунку 2.

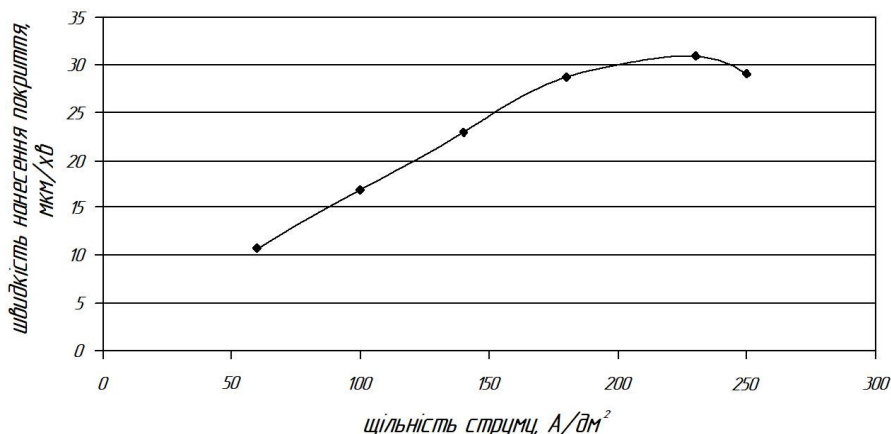


Рис. 2. Залежність швидкості нанесення покриття від катодної щільності струму

Із графіка видно, що із збільшенням щільності струму з 60 А/дм² до 230 А/дм² збільшується і швидкість нанесення покриття з 10,917 мкм/хв, при цьому якість нанесеного покриття залишається на хорошому рівні. При збільшенні щільності струму вище ніж 230 А/дм², зменшується швидкість нанесення і погіршується якість покриття.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Таким чином, застосування активатора при цинкуванні дозволяє в десятки разів збільшити швидкість нанесення покриттів і розширює діапазон застосування цинкових покриттів при відновленні деталей.

2. В результаті експериментів була виявлена залежність між зусиллям притискання, швидкістю руху активатора і швидкістю нанесення цинкового покриття, а також його якості. В подальших експериментах планується визначення найбільш раціональних умов нанесення цинкових покриттів з урахуванням вище перерахованого.

Література

1. Василенко М.О. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських агрегатів / М.О. Василенко // Теорія і практика розвитку АПК : матеріали Міжнародного науково-практичного форуму. – Львів, 2006. – С. 324–328.
2. Лапенко Т.Г. Відновлення деталей сільськогосподарських машин [Електронний ресурс] / Т.Г. Лапенко // ПДАУ. – 2011. – Режим доступу : <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2011/02/140.pdf>.
3. Закалов О.В. Основи тертя і зношування в машинах [Електронний ресурс] / О.В. Закалов, І.О. Закалов / ТНТУ ім. І. Пулюя – 2011. – Режим доступу : <https://core.ac.uk/download/pdf/60787657.pdf>.

References

1. Vasylenko M.O. Pidvyshchennia dovhovichnosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh silskohospodarskykh ahrehativ / M.O. Vasylenko // Teoriia i praktyka rozvytku APK : materialy Mizhnarodnoho naukovo-praktychnoho forumu. – Lviv, 2006. – S. 324–328.
2. Lapenko T.H. Vidnovlennia detalei silskohospodarskykh mashyn [Elektronnyi resurs] / T.H. Lapenko // PDau. – 2011. – Rezhym dostupu : <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2011/02/140.pdf>.
3. Zakalov O.V. Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh [Elektronnyi resurs] / O.V. Zakalov, I.O. Zakalov / TNTU im. I. Puluiia – 2011. – Rezhym dostupu : <https://core.ac.uk/download/pdf/60787657.pdf>.

КОСИЮК М. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4823-7800>e-mail: kosiyukm@khmnu.edu.ua

КОГЕНЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА НА ОСНОВІ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

В роботі розглянуто питання створення ефективних та екологічно чистих енергосистем на основі технології когенерації. Пропонується когенераційна установка на основі екологічно безпечної ресурсозберігаючої технології надкритичної гідротермальної деструкції органічних відходів. Автотермічні режими деструкції органічних відходів при надкритичних параметрах водного середовища призводять до отримання високоентальпійної парогазової суміші, яка може бути використана у схемах автономного енергетичного комплексу. Когенераційна установка може використовуватися для вирішення енергоефективної та екологічно безпечної утилізації органічних відходів. Дозволяє розв'язувати задачі автономного електро- і теплопостачання промислових та житлових об'єктів і має значний ринковий потенціал.

Ключові слова: теплоенергетика, енергоефективність, когенерація, відновлювані джерела енергії надкритичний стан води, деструкція, окислення.

Mykola KOSIYUK

Khmelnytskyi National University

COGENERATION DEVICE BASED ON INNOVATIVE TECHNOLOGY ORGANIZATION OF ORGANIC WASTE

This work considers the issue of creating efficient and environmentally friendly energy systems based on cogeneration technology. In industrialized countries, work is underway to develop and implement innovative technology for supercritical hydrothermal destruction of industrial and household waste and highly toxic substances. An extremely important urgent task is the complex solution of the problems of creating an autonomous energy complex based on the technology of cogeneration and utilization of organic waste and their use as renewable energy sources. Theoretical and experimental studies have shown that the method of supercritical hydrothermal destruction has high environmental and economic efficiency and demonstrates versatility, providing complete one-stage disposal of any organic waste. It is established that the reaction of supercritical aqueous oxidation of organic matter is exothermic and in the presence of only 15-20% of organic matter the waste processing process becomes autothermal.

Autothermal modes of destruction of organic waste at supercritical parameters of the aquatic environment lead to a high-enthalpy vapor-gas mixture, which can be used in the schemes of the autonomous energy complex. Cogeneration units are offered on the basis of a steam power plant operating on the Rankin cycle and on the basis of a heat engine with external heat supply, which operates on a closed thermodynamic Stirling cycle. A non-standard equipment of supercritical hydrothermal destruction technology is a quasi-flow reactor. The conducted research testifies to the possibility of further development of supercritical hydrothermal destruction technologies, both in terms of providing increased process parameters and in terms of developing increasingly reliable, productive and safe types of reactors. The development is based on the replacement of a single-pipe coaxial (two-pipe) reactor. This reactor design significantly expands the temperature and barometric performance characteristics, allows to increase the heat transfer surface and the temperature inside the reactor, bringing it closer to the external temperature of the reactor wall surface while maintaining performance. The cogeneration unit can be used to solve energy efficient and environmentally friendly disposal of organic waste. Allows to solve problems of autonomous electricity and heat supply of industrial and residential facilities and has significant market potential.

Key words: heat energy, energy efficiency, cogeneration, renewable energy sources, supercritical state of water, destruction, oxidation.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У провідних країнах світу здійснюється перехід на новий технологічний рівень, пов'язаний з енергозбереженням і скороченням використання традиційних ресурсів. Швидке виснаження основних енергоресурсів та їх стрімке подорожчання вимагають впровадження ефективних і екологічно чистих енергосистем. З початку ХХІ століття в енергетиці з єдиною енергетичною системою (ЄЕС), що об'єднує генерацію потужних теплових, атомних та гідроелектростанцій, позначилася тенденція масового будівництва джерел електроенергії невеликої потужності. Це обумовлено зростаючою вартістю послуг підключення до ЄЕС на тлі зниження надійності та якості централізованого енергопостачання, виснаження природних енергоресурсів та необхідності вирішення екологічних проблем [1, 2]. Світове зростання споживання енергії та обмеженість запасів мінеральних палив, з одного боку, високе поширення та відносно рівномірний розподіл відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), з іншого боку, означають, що в найближчій історичній перспективі привабливість ВДЕ буде неухильною зростати.

Відходи є однією з головних проблем на шляху стабільного розвитку економіки та суспільства в цілому. Людство утворює відходи, як у результаті своєї економічної діяльності, так і у результаті побутового повсякденного життя. Широке залучення вторинних енергетичних ресурсів, якими можуть виступати відходи, є дуже перспективним. Важливим є те, що раціональна утилізація позитивно позначається на екологічній безпеці.

Надзвичайно важливим актуальним завданням є комплексне вирішення проблем створення автономного енергетичного комплексу на основі технології когенерації та утилізації органічних побутових і промислових відходів і використання їх в якості відновлювальних джерел енергії.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій

Існуючі нині підходи до знищення високотоксичних речовин шляхом їх спалювання, поховання, хімічної та біологічної переробки дуже дорогі і не універсальні. В промислових розвинених країнах ведуться роботи з розробки і впровадження у різних галузях перспективної інноваційної технології надкритичної гідротермальної деструкції (ГТД) відходів та високотоксичних речовин, яка ґрунтується на властивостях води, які вона набуває при температурі $T > 374^{\circ}\text{C}$ та тиску $P > 22,1 \text{ МПа}$. Завдяки зміні своїх властивостей (зміна полярності, прискорення дифузії та ін.) у надкритичній воді виникає унікальна здатність розчиняти більшість органічних речовин. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що технологія надкритичної ГТД може претендувати на високу екологічну та економічну ефективність та демонструє при цьому універсальність, забезпечуючи повне одностадійне окислення будь-яких органічних речовин до нешкідливих продуктів та виділення з розчину неорганічних сполук у вигляді солей чи оксидів без небезпеки забруднення довкілля. Однією з основних переваг надкритичної ГТД є відсутність стадії попереднього сушіння вихідної сировини. Відходи можуть подаватися в реактор у вологому стані, наприклад, у вигляді водної суспензії, пульпи або розчину. Об'єктами застосування технології надкритичної ГТД можуть бути комунальні, промислові та інші рідкі стоки, що містять відходи нафтопереробної, хімічної, целюлозно-паперової, харчової, біологічної та фармацевтичної промисловості [3–7].

Встановлено, що реакція надкритичного водного окислення органіки екзотермічна і за наявності лише 15–20 % органічної речовини процес переробки відходів стає автотермічним. Автотермічні режими деструкції органічних відходів при надкритичних параметрах водного середовища призводять до отримання високоентальпійної парогазової суміші, яка може бути використана у схемах автономного енергетичного комплексу (при згорянні 1 кг бензину виділяється 40 Мдж тепла, а при окислюванні 1 кг будь-якої органіки до 20 Мдж тепла). Таким чином, органічні відходи можуть стати альтернативним паливом [5–7].

Формулювання цілей статті

Мета роботи – узагальнення результатів роботи з розробки когенераційної установки (КУ), що забезпечує знешкодження органічних відходів гідротермальним окислюванням у надкритичному середовищі з вирішення задач автономного електро- і теплопостачання промислових та житлових об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Пропонуються КУ на основі паросилової установки, яка працює за циклом Ранкіна і на основі теплового двигуна із зовнішнім підведенням тепла, який працює за замкненим термодинамічним циклом Стірлінга. Вони належить до галузей теплоенергетики та екології, зокрема до устаткування для знешкодження органічних відходів і можуть знайти застосування при створенні автономного енергетичного комплексу для забезпечення об'єктів малої розподіленої енергетики тепловою та електричною енергією. Блок схеми КУ зображені на рис. 1.

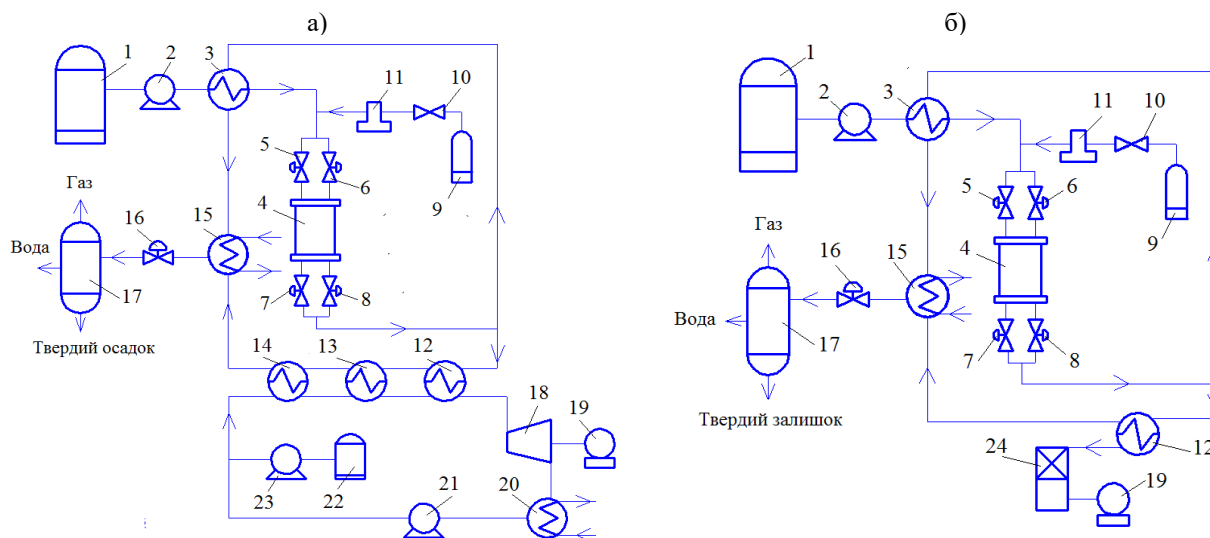


Рис. 1. Блок схеми КУ:

а) на основі паросилової установки, яка працює за циклом Ранкіна; б) на основі теплового двигуна із зовнішнім підведенням тепла, який працює за замкненим термодинамічним циклом Стірлінга, де 1 – місткість з органічними відходами (суспензія, емульсія, розчин); 2 – насос високого тиску; 3 – підігрівач; 4 – реактор надкритичної ГТД; 5, 6, 7, 8 – клапанні пристрої; 9 – місткість для окислювача; 10 – клапанний пристрій; 11 – компресор; 12 – пароперегрівач (теплообмінник); 13 – випарник (теплообмінник); 14 – економайзер (теплообмінник); 15 – конденсатор; 16 – клапанний пристрій; 17 – сепаратор; 18 – парова турбіна (паровий двигун, наприклад, поршневий, роторний, роторно-лопатевий); 19 – електрогенератор; 20 – конденсатор; 21 – насос води; 22 – місткість з водою; 23 – насос; 24 – двигун Стірлінга

Ефективність будь-якої технології, у тому числі і технології надкритичної ГТД багато в чому залежить від складу обладнання, що використовується. Нестандартним обладнанням цієї технології є реактор – посуд високого тиску, який працює у квазіпроточному режимі. Розробка та виготовлення таких реакторів вимагають нестандартних конструкторських і технологічних рішень, оскільки надкритичне водне

середовище гарантовано досягається при тиску більше 22 МПа і температурі не нижче 374°C. Найбільшого ефекту у вирішенні проблеми теплообміну можна досягти конструкторськими рішеннями при вдосконаленні конструкції реактора, а саме збільшенням загальної поверхні теплообміну шляхом створення більш дрібних об'ємів реакційних камер всередині реактора. В основі пропонованої розробки лежить заміна однострубного на коаксіальний багатотрубний реактор, в якому не менше двох реакційних камер. Така конструкція реактора суттєво розширює температурні та барометричні експлуатаційні характеристики, дозволяє збільшити поверхню теплообміну і температуру всередині реактора, наблизивши її до зовнішньої температури поверхні стінки реактора при збереженні продуктивності.

Процес надкритичної ГТД органічних відходів здійснюється у замкнутому технологічному циклі з виведенням у зовнішнє середовище лише продуктів остаточного знешкодження. Залежно від призначення КУ об'єм реактора вибирається від 1 до 20 л. Час перебування реакційної суміші в ньому від 10 секунд до 1 хвилини, тому навіть при невеликому об'ємі реактора продуктивність КУ досить велика. Проведені дослідження свідчать про можливість подальшого розвитку технологій ГТД, як щодо забезпечення підвищених параметрів процесів, так і в частині розробки все більш надійних, продуктивних і безпечних в експлуатації типів реакторів. З'являється можливість здійснення процесів деструкції органічних речовин та відходів у реакторі при температурі більше 400°C та тисках 35–40 МПа. На рис.2 зображено загальний вигляд і поперечний розріз коаксіального (двотрубного) реактора для проведення хімічних реакцій при надкритичних параметрах водного середовища.



Рис. 2. Просторові схеми коаксіального (двотрубного) реактора:

а) загальний вигляд реактора; б) поперечний переріз реактора, де 4 - реактор; 25 - нижня кришка реактора; 26 - верхня кришка реактора; 27 і 28 - фланцеві з'єднання із кріпильними елементами; 29 - внутрішня труба реактора; 30 - зовнішня труба реактора; 31 - електричні нагрівальні елементи з термоізоляцією; 32 - теплоізолюючий кожух

КУ працює наступним чином. Попередньо підготовлені органічні відходи (суспензія, емульсія, розчин) з місткості 1 подаються насосом високого тиску 2 через підігрівач 3 в коаксіальний (двотрубний) реактор 4 із забезпеченням надкритичних параметрів води ($P > 22,1$ МПа і $T > 374^\circ\text{C}$). При таких умовах вода перетворюється на ідеальний розчинник. Окислювач (повітря, кисень, перекис водню або їх суміші) подається із місткості 9 через клапанний пристрій 10, компресором 11 в реактор 4. Клапана система реактора 4, завдяки використанню клапанних пристроїв 5, 6, 7, 8 виконана з можливістю забезпечення квазіпроточного режиму. Використання цифрової системи керування технологічними параметрами КУ за допомогою зворотних зв'язків, забезпечує її роботу у відповідності до заданих алгоритмів.

Коаксіальний (двотрубний) реактор 4 має дві реакційні камери для проведення хімічних реакцій при надкритичних параметрах водного середовища. Він містить щонайменше одну внутрішню трубу 29, зовнішню трубу 30, нижню кришку 25, верхню кришку 26, які з'єднані фланцями із кріпильними елементами 27 і 28. Кришки 27 і 28 оснащені технологічними патрубками, які з'єднані з відповідними клапанними пристроями 5, 6, 7, 8. Внутрішня поверхня кришок має еліпсоїдну форму, витягнуту вздовж поздовжньої осі реактора 4. Фланцеві з'єднання 27 і 28 із кріпильними елементами забезпечують герметичність і міцність зібраних конструкцій. На зовнішній трубі 30 встановлено електричні нагрівальні елементи 31, наприклад, індукційні з термоізоляцією. Кришки 25 і 26 реактора 4 мають теплоізолюючий кожух 32. Парогазова суміш, що утворюється в реакторі 4 подається в конденсатор 15, клапанний пристрій 16 і сепаратор 17. В сепараторі 17 проходить процес розділення вихідного продукту на нешкідливі газ, твердий осадок і воду з можливістю її повторного використання в технологічному циклі. Оскільки реакція надкритичного водного окислення органіки екзотермічна, то це дозволяє ефективно використовувати тепло самої реакції, як для підтримки температурного режиму в реакторі 4 для здійснення процесу надкритичного водного окислення, так і для компенсації енерговитрат на розігрів реагентів. Парогазова суміш, яка утворюється в реакторі 4 при надкритичній ГТД органічних відходів, може бути високоентальпійним робочим тілом для ефективної і екологічно чистої генерації теплової і електричної енергії.

При реалізації схеми когенерації (рис.1, а) на основі паросилової установки, яка працює за циклом Ранкіна парогазова суміш із реактора 4 проходить через пароперегрівач 12, випарник 13 і економайзер 14.

Робоча рідина, вода, підготовлена, наприклад, за допомогою технології зворотного осмосу (технологія очищення води, при якій рідина проходить через спеціальну мембрану, позбавляючись від хімічних домішок і бактерій), подається із місткості 22 за допомогою живильного насоса 23 у пристрій для підігрівання води (економайзер) 14, випарник 13 і пароперегрівач 12. Пара високого тиску і температури

подається у турбіну (паровий двигун, наприклад, поршневий, роторний, роторно-лопатевий) 18, де відбувається перетворення потенційної енергії пари в кінетичну енергію потоку пари (швидкість потоку надзвукова). Кінетична енергія надзвукового потоку перетворюється у роботу турбіни (парового двигуна) 18, що затрачується на вироблення електричної енергії в генераторі 19. Після турбіни (парового двигуна) 18 пара спрямовується у конденсатор 20. Це звичайний теплообмінник, усередині труб якого проходить охолодна вода, ззовні - водяна пара, що конденсується. Цей конденсат (вода) надходить у живильний насос 21, де відбувається збільшення тиску до номінальної (проектної) величини, подається в економайзер 14 і цикл замикається.

При реалізації схеми когенераційної установки на основі теплового двигуна із зовнішнім підведенням тепла (рис. 1,б) парогазова суміш, що утворюється в реакторі 4 подається у теплообмінник 12. Двигун Стірлінга, який працює за замкненим термодинамічним циклом, виконує перетворення теплової енергії, отриманої від теплообмінника 12, на механічний рух електрогенератора 19 завдяки зміні температури робочого тіла, що циркулює в закритому об'ємі.

Парогазова суміш, яка пройшла через парогазову установку з блоком підготовки і подачі робочого тіла для теплового двигуна подається в конденсатор (пароводяний теплообмінник) 15 і/або 20 для отримання гарячої води і подачі її в систему опалення і/або термоізолювану місткість з гарячою водою для подачі споживачам.

В пропонованій КУ використовується інноваційна технологія надкритичної ГТД органічних відходів., що значно розширює її функціональні можливості. Збільшення ККД досягається оснащенням КУ цифровою системою керування, кількома реакторами, що працюють паралельно, причому модулі підготовки і подачі органічних відходів, реактор із клапанними пристроями, тепловий двигун, теплообмінники, насоси, місткості із окиснювачем і водою з'єднують термоізолюваними трубопроводами. Її можна виготовляти з використанням відомих у промисловості матеріалів, устаткування та інструментів. Природно, що при виборі конкретних форм практичного здійснення КУ можливі доповнення і/або уточнення з використанням звичайних знань фахівців.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розглянуті питання створення ефективних і екологічно чистих енергосистем на основі технології когенерації. Пропонується КУ, яка може використовуватися для вирішення енергоефективної та екологічно безпечної утилізації органічних відходів. Вона має значний ринковий потенціал і може успішно використовуватися для вирішення задач щодо створення автономного, стаціонарного або мобільного енергетичного комплексу для забезпечення електричною і тепловою енергією промислових та житлових об'єктів. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу окремих модулів КУ за різними критеріями, що важливо для її практичного використання.

Література

1. Косіюк М.М. Автономна високоефективна когенераційна установка / М.М. Косіюк, А.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 2. – С. 84–87.
2. Патент 143842 Україна, МПК F01B 23/10, F01K 3/20, F02G 1/043. Когенераційна установка / Косіюк М.М., Косіюк А.М. – № u202002008 ; заявл. 23.03.2020 ; опубл. 10.08.2020, Бюл. № 15.
3. Yesodharan S. Supercritical water oxidation: An environmentally safe method for the disposal of organic wastes. Current Science. 2002. Vol. 82. P. 1112–1122.
4. Toor S.S., Rosendahl L., Rudolf A. Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies. Energy. 2011. T. 36, № 5. P. 2328–2342.
5. Mazalov Y., Pustovgar A., Grigorev V., Vedenin A., Adamtsevich A., Technology for Hydrothermal Destruction of Organic Fuel Materials. Applied Mechanics and Materials. 2015. T. 752. P. 873–877.
6. Queiroz J. P. S. et al. Supercritical water oxidation with hydrothermal flame as internal heat source: Efficient and clean energy production from waste. The Journal of Supercritical Fluids. 2015. T. 96. P. 103–113.
7. Cui C. et al. Review on an advanced combustion technology: Supercritical hydrothermal combustion. Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 5. P. 1645.

References

1. Kosiuk M.M. Avtonomna vysokoeffektivna koheneratsiina ustanovka / M.M. Kosiuk, A.M. Kosiuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2020. – № 2. – S. 84–87.
2. Patent 143842 Ukraine, MPK F01B 23/10, F01K 3/20, F02G 1/043. Koheneratsiina ustanovka / Kosiuk M.M., Kosiuk A.M. – № u202002008 ; zaivl. 23.03.2020 ; opubl. 10.08.2020, Biul. № 15.
3. Yesodharan S. Supercritical water oxidation: An environmentally safe method for the disposal of organic wastes. Current Science. 2002. Vol. 82. P. 1112–1122.
4. Toor S.S., Rosendahl L., Rudolf A. Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies. Energy. 2011. T. 36, № 5. P. 2328–2342.
5. Mazalov Y., Pustovgar A., Grigorev V., Vedenin A., Adamtsevich A., Technology for Hydrothermal Destruction of Organic Fuel Materials. Applied Mechanics and Materials. 2015. T. 752. P. 873–877.
6. Queiroz J. P. S. et al. Supercritical water oxidation with hydrothermal flame as internal heat source: Efficient and clean energy production from waste. The Journal of Supercritical Fluids. 2015. T. 96. P. 103–113.
7. Cui C. et al. Review on an advanced combustion technology: Supercritical hydrothermal combustion. Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 5. P. 1645.

КУЧЕРЕНКО Ю. С.

Вінницький національний аграрний університет

e-mail: fortyna1910@gmail.com

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Розвиток країни визначається ефективністю роботи підприємств та організацій, які мають не просто виживати у складних умовах, а проводити активну стратегію перетворень. Інновації в галузі технології захисних та декоративних покриттів металу створюють необхідний рівень конкуренції на вітчизняному лакофарбовому покритті.

У цій роботі проведено аналіз сучасних технологій покриттів, визначені сильні та слабкі сторони різних технологій покриттів.

Ключові слова: технології покриттів, захист від корозії, металеві, неметалеві (керамічні), полімерні покриття, електрохімічні технології.

Yuliya KUCHERENKO

Vinnytsia National Agrarian University

MODERN COATING TECHNOLOGIES

The development of the country is determined by the efficiency of enterprises and organizations, which should simply survive in difficult conditions, and pursue an active strategy of transformation. Innovations in the technology of protective and decorative metal coatings create the necessary level of competition in the domestic paint and varnish coating.

Innovative development of the country's economy is one of the highest priorities of state policy. The strategy of modernization is determined by the consistent transition of the economy to an innovative model of development to solve the problem of strategic support for sustainable and long-term dynamics of innovation processes. However, today there is no necessary level of competition in the domestic innovation market and entrepreneurs are aware of the importance of innovation in creating competitive advantages, as well as an adequate legal framework governing relations in the field of innovation. In addition, the generation of knowledge takes place in the public sphere, the application of this knowledge or the implementation of the obtained scientific and technical results is in the commercial industry. Metal has been and remains the main structural material of the industry - from means of production to consumer products, and the primary consumer properties of the product include its appearance and durability. Rust can kill these qualities in a matter of months and days, so perhaps more important is the quality of the product itself, and the quality of its coating.

In this paper, an analysis of modern coating technologies is carried out, the strengths and weaknesses of different coating technologies are identified.

Keywords: coating technologies, corrosion protection, metal, non-metal (ceramic), polymer coatings, electrochemical technologies.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Інноваційний розвиток економіки країни віднесено до вищих пріоритетів державної політики. Визначається стратегією модернізації послідовний перехід економіки на інноваційну модель розвитку для вирішення проблеми стратегічного забезпечення сталої та довготривалої динаміки інноваційних процесів.

Проте, на сьогоднішній день відсутній необхідний рівень конкуренції на вітчизняному інноваційному ринку та усвідомлення підприємцями значущості інновацій у створенні конкурентних переваг, а також адекватного правового поля, що регулює відносини у сфері інновацій. Крім того, генерація знань відбувається у державній сфері, застосування цих знань чи впровадження отриманих науково-технічних результатів перебуває у комерційній галузі.

Метал був і залишається основним конструкційним матеріалом промисловості – від засобів виробництва до споживчих продуктів, причому, у першочергові споживчі властивості товару входять його зовнішній вигляд та довговічність. Іржа здатна вбити ці якості за лічені місяці та дні, тому можливо важливіша не якість самого виробу, а якість його покриття.

Спробую розібратися лише з основними технологіями нанесення покриттів для захисту від корозії, перспективами старих методів та успіхами нових.

Виклад основного матеріалу

Для захисту металів і насамперед – захисту від корозії сталі застосовується три групи покриттів:

- металеві;
- неметалічні (керамічні);
- полімерні.

Особливо високі результати, наприклад, автопромисловості, досягаються застосуванням багатошарових комбінованих покриттів сталевих прокатів.

Ефективний захист чорного металу (тобто різке зниження швидкості корозії) досягається трьома методами:

- зміною самого металу та його оксидної плівки (наприклад, складу металу до нержавіючих і сталей тощо);
- застосуванням захисних металевих покриттів (цинкування тощо);
- застосуванням захисних неметалічних покриттів (полімерних тощо).

Безумовно, ефективна комбінація різних методів, наприклад формування багатошарових покриттів металу. Все це відноситься до поширених умов експлуатації металевих виробів в умовах нашого клімату [1].

Електрохімічні технології нанесення покриттів.

Цей метод дозволяє захищати матеріал нанесенням лише металевих покриттів із чистих металів та (рідше) – окремих сплавів.

Перевага методу в тому, що він добре технологічно відпрацьований і універсальний для нанесення багатьох металів (і ряду сплавів) на електропровідну основу. Складом електроліту та режимом роботи (температура, струм) можна легко регулювати як властивості, так і товщину покриття. Якість покриття (суцільність тощо) за суворого дотримання технології висока [1].

Загальним недоліком всіх електрохімічних методів є додатковий процес якісного очищення поверхні металу до покриття. Іншим недоліком цієї технології часто є її екологічна шкідливість (від середньої до високої), що залежить від хімреактивів очищення, електроліту, відходів процесу. Особливо токсичні та небезпечні технології кадмування, свинцювання, електроліти хромування, золочення та сріблення. Пошук більш безпечних реагентів дає малі результати.

«Гарячий» спосіб нанесення покриттів.

"Гарячим" способом (зануренням металу в розплав) – як правило, наносять покриття цинку, олова, алюмінію та ряду сплавів (і малого ряду керамічних емалей). Захищається від корозії цими способами переважно сталь [2]. Оскільки набір придатних при цьому методу розплавів дуже обмежений, то на універсальність метод не претендує.

Перевага його – найвища продуктивність. Покриття, товщиною до часток міліметра, формується за лічені секунди. Тому комплекс обладнання для покриттів із розплавів добре вписується у сучасні безперервні технологічні лінії.

Недоліком методу є не надто висока рівномірність покриття. При цинкуванні деталей зануренням товщина шару на окремих ділянках через напливи коливається від номіналу в 5–50 мкм до 0,2 мм і більше. Методів чіткого регулювання товщини покриття та його якості для цього методу в принципі немає. Однак для рулонного листового прокату відпрацювання та стабілізація режиму нанесення забезпечує дуже високу якість покриття.

Гарячеоцинкована сталь (аркуш, труби та деталі) є найбільш масовою продукцією світової металургії, захищеної від корозії.

Європейські та американські стандарти включають тонку оцинковану смугу (товщиною менше 0,4 мм), тонкі покриття (до 10 мкм) та цинкування г/к листа, в Україні випускають оцинкування товщиною від 0,5 до 2,5 мм.

Недоліком застосування готового оцинкованого прокату є незахищеність відрізних кромок, отворів, зварювальних швів тощо. Повний захист можливий при гарячому цинкуванні готових металоконструкцій та деталей. Технологія повного цинкування конструкцій не є безперервною, але більш продуктивна, ніж електролітична. Якість забезпечується повним дотриманням технології процесу (починаючи від очищення деталі) і є дуже високою.

Іонне (вакуумно-плазмове) нанесення металевих та інших покриттів.

Нанесення декоративно-захисних покриттів за допомогою вакуумних іонно-плазмових (вакуумно-дугового та магнетронного) методів напilenня знаходить широке поширення завдяки екологічній чистоті виробництва та високій якості одержуваних декоративно-захисних плівок [3].

За допомогою вакуумних методів нанесення захисно-декоративних покриттів можливо формувати плівки з різних металів та їх сполук: титану, цирконію, алюмінію, срібла, хрому, нікелю, ніобію, танталу, нержавіючої сталі, нітриду титану ($TiNx$), нітриду оксиду титану ($TiOx$), оксиду цирконію ($ZrOx$), оксиду алюмінію (Al_2O_3), оксикарбиду титану ($TiCxOy$), оксикарбиду цирконію ($ZrCxOy$), карбонітриду титану ($TiNx Cz$) тощо.

Шляхом застосування різного поєднання реактивних газів (азоту, ацетилену, кисню, вуглекислого газу) можна отримати практично будь-який колірний відтінок.

Декоративно-захисні покриття наносяться вакуумними методами на вироби з міді, латуні, мельхіору, нейзильберу, сталі, алюмінієвих сплавів, томпаку, пластмас, скла, кераміки тощо. Для виправлення недоліків шорсткості та фактури поверхні заготовок, отримання необхідних механічних та корозійних властивостей поверхні виробів необхідно наносити на матеріали деякі додатково бар'єрні шари. Як бар'єрні шари застосовуються гальванічні (хром, мідь-хром), лакофарбові матеріали (наприклад, при напilenні на пластмаси). Іноді на декоративні покриття наносяться захисні плівки (наприклад, лакові при напilenні на пластик).

Якість декоративно-захисних покриттів повністю визначається якістю поверхні заготовок (шорсткість, фактура тощо), якістю підготовки поверхні заготовок (наявність забруднень, наявність окисних плівок, ступенем активації поверхні іонним травленням), культурою виробництва.

Недоліком вакуумного іонно-плазмового напilenня є те, що не допускається подальша механічна обробка деталей, їх паяння, зварювання.

Полімерні (лакофарбові) покриття.

Полімерні покриття є досить популярним лакофарбовим матеріалом. У лакофарбовій промисловості вони з'явилися порівняно давно. Проте, справжнім проривом у цій галузі було створення порошкових полімерів, які відрізняються своєю надзвичайною якістю покриття та довговічністю [4]. Дані покриття, в порівнянні з іншими синтетичними полімерами, є молодшими на ринку лакофарбової продукції.

На сьогоднішній день порошкові полімерні покриття через свої унікальні властивості застосовуються практично в кожній сфері людської діяльності. Особливо популярними є при фарбуванні різних металевих поверхонь, у тому числі металочерепиці, човнів, а також автомобілів. Така популярність

обумовлена високими захисними властивостями полімерного покриття, яким покриття зобов'язані своїми компонентами. Практично всі склади полімерних покриттів містять у собі основну сполучну речовину, яка складається з основи та затверджувача.

Полімерні покриття мають свої особливості під час їх нанесення, у зв'язку з якими вони не просто покривають поверхню, а проникають до неї, тобто. зв'язуються з поверхнею, особливо металевою, на молекулярному рівні;

Полімерне покриття стійке до впливу вологого середовища, ультрафіолету, до високих температур, до агресивного лужного середовища, а також до будь-яких хімікатів, у тому числі розчинників. Для фарбування металевих виробів необхідне спеціальне обладнання фарбопульту. Його особливість полягає в тому, що він не лише виступає пульверизатором, а й заряджає порошок електрикою. Таким чином, бак фарбопульту підключається до позитивного заряду, тоді як виріб, на який наноситься фарба, має негативний заряд. Це забезпечує виникнення магнітної індукції при зіткненні фарби з поверхнею. Ця магнітна індукція чимось схожа на ту, яка виникає при замиканні електрода в дуговому зварюванні. Саме завдяки цьому і відбувається з'єднання молекул фарби та поверхні, що фарбується.

Недоліками полімерних (лакофарбових) покриттів є висока вартість покриття, проблематичність видалення покриття, відсутність можливості самостійного покриття. Полімерні покриття підходять лише для металевих поверхонь. Крім цього, з часом відбувається старіння лакофарбових покриттів, що призводить до виникнення дефектів плівки і відповідно збільшує проникність агресивного середовища. Цей недолік відсутній у модифікованих лакофарбових покриттях, які використовуються для захисту виробів від атмосферних впливів, хімічних реагентів, розчинників, миючих засобів, горючих та мастильних матеріалів, біологічних факторів для надання поверхні антистатичних властивостей, що перешкоджають накопиченню на ній електричних зарядів, створення на поверхні виробу електропровідного шару перед металізацією гальванічним способом, підвищення твердості та зносостійкості полімерних виробів, стабілізації властивостей міцності, тимчасового захисту виробів при транспортуванні та зберіганні [5]. Покриття використовують також для стабілізації вихідних властивостей полімерних матеріалів та отримання виробів з необхідними декоративними властивостями. Декоративні покриття призначені для вирівнювання поверхні та закладення в ній вад, пор, текстури наповнювача та пошкоджень, надання поверхні блиску та кольору, створення однотонного покриття у виробів, зібраних із різних деталей.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті проведено аналіз сучасних технологій нанесення покриттів, визначені сильні та слабкі сторони різних технологій. Таким чином, вибір залишається за споживачем: які розроблені види технологій підходять до конкретних потреб, виходячи з перерахованих основних видів і характеристик нанесення захисно-декоративних покриттів.

Література

1. Рожков И.М., Бойков А.А., Ларионова И.А., Калинин О.И., Костюхин Ю.Ю. Комплексная оценка эффективности функционирования металлургического предприятия. Металлург. 2016. № 10. С. 11–17.
2. Промышленное производство и металлургия. 2020. URL: <https://nti.urfu.ru/data/pages/3/content/files/sbornikkonflCIMMRINC.pdf>
3. Силаева А.А., Лукьянскова А.И., Макаров А.В., Пелясова Д.А., Квасников М.Ю. Лакокрасочные металлополимерные покрытия, полученные путем совместного осаждения меди, никеля и полимерного связующего на катоде. Успехи в химии и химической технологии. 2016, № 10. Р. 88-89.
4. Бик М. В., Букет О. И., Васильев Г. С. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування : підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23891/3/Metody_zahystu_obladn_vid_kor.pdf.
5. Боротьба з корозією металів екологічно чистими засобами. Економіка та держава. 10. 2018. Р. 63–67. URL: http://www.economy.in.ua/pdf/10_2018/14.pdf.

References

1. Rozhkov I.M., Bojkov A.A., Larionova I.A., Kalinskij O.I., Kostjuhin Ju.Ju. Kompleksnaja ocenka jeffektivnosti funkcionirovanija metallurgicheskogo predpriyatija. Metallurg. 2016. № 10. S. 11–17.
2. Promyshlenoe proizvodstvo i metallurgija. 2020. URL: <https://nti.urfu.ru/data/pages/3/content/files/sbornikkonflCIMMRINC.pdf>
3. Silaeva A.A., Lukjanskova A.I., Makarov A.V., Peljasova D.A., Kvasnikov M.Ju. Lakokrasochnye metallopolymernye pokrytija, poluchennye putem sovmestnogo osazhdenija medi, nikelja i polimernogo svjazujushhego na katode. Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii. 2016, № 10. P. 88-89.
4. Byk M. V., Buket O. I., Vasylijev H. S. Metody zakhystu obladnannia vid korozii ta zakhyst na stadii proektuvannia : pidr. dlja stud. spetsialnosti 161 «Khimichni tekhnologii», spetsializatsii «Elektrokhimichni tekhnologii neorhanichnykh ta orhanichnykh materialiv». Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2018. 318 s. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23891/3/Metody_zahystu_obladn_vid_kor.pdf.
5. Boroťba z korozieiu metaliv ekolohichno chystymy zasobamy. Ekonomika ta derzhava. 10. 2018. P. 63–67. URL: http://www.economy.in.ua/pdf/10_2018/14.pdf.

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г.

Київський національний університет технологій та дизайну,
ЗВО «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
<https://orcid.org/0000-0001-6258-0088>
e-mail: markzalubovskiy@gmail.com

ПАНАСЮК І. В.

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>
e-mail: panasyuk1961@gmail.com

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГАЛТУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ТИПУ «TURBULA» ПРИ ВИКОНАННІ ВІДДІЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ВІД ЛИВНИКІВ

Запропоновано конструкцію галтувальної машини типу «Turbula» зі складним просторовим рухом робочої ємкості для виконання технологічної операції відділення металевих деталей від ливників. Дану конструкцію машини реалізовано шляхом поєднання в одній конструкції галтувальної ємкості (відділення деталей від ливників) та вібраційного сита (сепарація відділених деталей від ливників). Експлуатація такої конструкції дозволяє в разі скоротити час, що витрачається на виконання даної технологічної операції, зокрема, за рахунок забезпечення зручного та безперешкодного вивантаження оброблених деталей без застосування ручної праці для перевантаження робочого масиву та подальшого досягнення сепарації деталей від ливників. Аналітичним шляхом виконано техніко-економічне обґрунтування використання галтувального обладнання типу «Turbula» зі складним просторовим рухом робочої ємкості для реалізації технологічної операції відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Розраховано очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої галтувальної машини типу «Turbula» зі складним просторовим рухом робочої ємкості для виконання технологічних операцій відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників складе 25'688,7 грн на одну одиницю обладнання. Розроблену конструкцію машини можна використовувати для будь-яких типів деталей (металевих чи полімерних), формоутворення яких відбувається шляхом лиття. Отримані результати досліджень можуть бути використані у відповідних конструкторських бюро машинобудівних підприємств на стадії проектування галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей.

Ключові слова: робоча ємкість, сепарація, відділення деталей від ливників, складний просторовий рух.

Mark ZALYUBOVSKYI

Kyiv National University of Technology and Design,
Open International University of Human Development "Ukraine"

Igor PANASYUK

Kyiv National University of Technology and Design

TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE USE OF TURBULA TYPE-EQUIPMENT EQUIPMENT IN THE PERFORMANCE OF METAL DETAILS DEPARTMENT

The types of shredding equipment used at domestic enterprises to perform the technological operation of separating parts from foundries are analyzed. It is established that machines with rotational movement of working tanks have low productivity of performance of these technological operations. In addition, a lot of time is spent on manual labor, in particular, reloading the working array to the vibrating screen. The design of the «Turbula» type galvanizing machine with complex spatial movement of the working capacity for the technological operation of separating metal parts from the foundries is proposed. This design of the machine is realized by combining in one design of the galvanizing tank (separation of parts from the foundries) and vibrating sieve (separation of separated parts from the foundries). Operation of such a structure allows to reduce the time spent on this technological operation, in particular, by providing convenient and unobstructed unloading of machined parts without the use of manual labor to overload the working array and further achieve separation of parts from foundries. The feasibility study for the use of «Turbula» equipment with complex spatial movement of the working capacity for the implementation of the technological operation of separating the metal parts of the "zipper" lock from the foundries was performed analytically. The expected annual economic effect from the introduction of the developed «Turbula» type machine with complex spatial movement of the working capacity to perform technological operations of separation of metal parts of the lock "lightning" from the foundries will be 25'688.7 UAH per unit of equipment. The developed design of the machine can be used for any type of parts (metal or polymer), which are formed by casting. The obtained research results can be used in the relevant design offices of machine-building enterprises at the stage of designing galvanizing equipment with complex spatial movement of working tanks.

Key words: working capacity, separation, separation of parts from foundries, complex spatial movement.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Підвищення продуктивності виготовлення дрібних металевих деталей значною мірою залежить від зменшення часу, що витрачається на фінішні галтувальні технологічні операції [1]. Зокрема, у легкій промисловості формоутворення невеликих типових деталей та виробів (фурнітура, застібки, гудзики, деталі замка блискавка) часто реалізується шляхом лиття [2]. Після чого, ці деталі потребують проведення дуже трудоемних фінішних галтувальних технологічних операцій – відділення металевих деталей від ливників з подальшою їх сепарацією [3]. Зазвичай, такі галтувальні технологічні операції виконуються засобами малої

механізації (інколи із використанням ручної праці) або із застосуванням галтувальних барабанів із обертальним рухом робочих ємкостей [4] чи вібраційних машин [5].

Відомо [1], що такі типи галтувального обладнання, які застосовуються для вищезгаданих технологічних операцій, мають низьку продуктивність, їх використання призводить до значних енергозатрат. У кінцевому результаті такі фактори спричиняють значне підвищення цін на кінцевий продукт, зменшення його конкурентоспроможності в ринкових умовах.

Підвищення продуктивності фінішних галтувальних технологічних операцій можна досягнути шляхом заміни на підприємствах застарілого обладнання на нове, яке має високопродуктивні властивості. Перспективним типом обладнання можуть бути машини типу «Turbula» [6], у яких робоча ємкість виконує складний просторовий рух та, цим самим, забезпечує значну інтенсифікацію руху робочого масиву (деталі та наповнювач) в середині ємкості.

Авторами був розроблений ряд галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей [7–10], які забезпечують значну продуктивність виконання відповідних технологічних операцій. Таким чином, необхідно виконати техніко-економічне обґрунтування використання розробленого галтувального обладнання типу «Turbula» порівняльним методом при виконанні на прикладі виконання технологічної операції відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників.

Аналіз досліджень та публікацій

Відома ціла низка вітчизняних та іноземних публікацій, у яких наведено безумовні переваги галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Наприклад, у роботах [11, 12] було доведено, що із використанням машини типу «Turbula» можна досягнути рекордно-короткого часу при реалізації процесів змішування двох і більше дрібнодисперсних сипких речовин, лише за 10 обертів ведучого валу машини індекс сегрегації відповідав випадковому розподілу окремих частинок двох фракцій сипкого середовища між собою. Попередніми дослідженнями [1] було встановлено, що для виконання технологічних операцій полірування полімерних деталей (гудзиків), обладнання, в якому робоча ємкість виконує складний просторовий рух, є значно ефективнішим за обладнання з обертовим барабаном. Експериментальні дослідження [13] показали, що для обробки гудзиків в машині зі складним рухом робочої ємкості потрібно у півтора рази менше часу ніж при аналогічній обробці у машині з обертовим барабаном. А при виконанні експериментальних досліджень [14, 15] відділення металевих деталей від ливників, було встановлено, що із використанням машин типу «Turbula» можна витратити в 10 разів менше часу ніж при аналогічній обробці у машині з обертовим барабаном.

Виділення невирішених частин

Незважаючи на проведені дослідження щодо доцільності використання машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу «Turbula» для реалізації фінішних галтувальних технологічних операцій, залишається відкритим питання щодо можливості застосування такої машини при виконанні технологічної операції відділення металевих деталей від ливників.

Формулювання цілей

Суть даної роботи полягає у техніко-економічному обґрунтуванні використання галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу «Turbula» для реалізації технологічної операції відділення металевих деталей від ливників.

Виклад основного матеріалу

Дослідження виконувалися із використанням металевих деталей замків «блискавка», формоутворення яких відбувається шляхом лиття. На основі виконання галтувального технологічного процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників порівнювали два типи галтувального обладнання: звичайний обертовий барабан, що використовується на підприємстві ПрАТ «Молнія» для реалізації вищезгаданих технологічних операцій та розроблену авторами машину [16] зі складним просторовим рухом робочої ємкості.

Розглянемо «базовий» технологічний процес відділення металевих деталей замка блискавка від ливників із застосуванням обертового барабану: на ПрАТ «Молнія» для реалізації даної технологічної операції використовується галтувальний розділово-полірувальний 8-гранний барабан K-36 «Optilon» (об'єм барабану 0,12 м³). Фото барабану K-36 «Optilon» представлено на рис. 1.

Згідно затвердженого на ПрАТ «Молнія» технологічного регламенту, базовий процес повного відділення партії деталей від ливників включає у себе такі етапи:

1. Відділення деталей від ливників у обертальному барабані. Середня тривалість такого процесу $t_{відд\ell}$ відділення партії деталей від ливників (30–45 кг) в барабані, в залежності від типу деталей та ливників, становить від 20 до 70 хвилин безперервної роботи барабану. В середньому на дану технологічну операцію витрачається до 45 хв часу.

2. Перевантаження деталей. Після відділення деталей від ливників у барабані необхідно виконати їх сепарацію. Для цього використовується вібраційне сито (віброгрохот). Перевантаження деталей з ливниками з галтувального барабану до вібраційного сита відбувається вручну. За один раз на вібраційному ситі можна

виконати сепарацію від ливників не більш ніж третини від усіх оброблених деталей. В зв'язку з цим, в середньому, на перевантаження деталей, витрачається до $t_{\text{перевантаж.}} = 45$ хвилин технологічного часу.

3. Сепарація деталей. Тривалість $t_{\text{сепарації}}$ просіювання деталей крізь вібростоло, що має відповідні розміри отворів, в залежності від типорозміру деталей та конструкції ливника, для всіх оброблених деталей, у середньому становить 20 хв.



Рис. 1. Фото барабану К-36 «Optilon»

Розрахуємо загальний час виконання повного відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників $t_{\text{заг.}}$:

$$t_{\text{заг.}} = t_{\text{відділ.}} + t_{\text{перевантаж.}} + t_{\text{сепарації}} = 110 \text{ хв,} \quad (1)$$

Таким чином, загальний час на виконання даної технологічної операції, в середньому, становить приблизно 110 хв.

У свою чергу, авторами було розроблено галтувальну конструкцію машини типу «Turbula», яка дозволяє забезпечити зручне та безперешкодне вивантаження оброблених деталей без застосування ручної праці, досягнути сепарації деталей від ливників.

Дана машина (рис. 2) містить станину 1, в якій розміщений електродвигун 2, вал 3 якого, за допомогою фланцевої муфти 4, жорстко з'єднаний зі швидкохідним валом 5 редуктора 6. Тихохідний вал 7 редуктора 6 за допомогою муфти вільного ходу 8 з'єднаний з ведучим валом 9, який встановлений в підшипниковій опорі 10. Ведений вал 11 кінематично з'єднаний з коромислом 12, що встановлене в підшипниковій опорі 13 з можливістю коливального руху у вертикальній площині. Ведучий 9 та ведений 11 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з вилками 14 та 15 відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 16 і 17 являються вісями кріплення робочої ємкості 18. Ведучий шків 19 пасової передачі за допомогою муфти вільного ходу 20 з'єднаний зі швидкохідним валом 5 редуктора 6. Ведений шків 21 пасової передачі жорстко закріплений на ексцентриковому валу 22, що встановлений в підшипникових опорах 23 та 24. На ексцентриковому валу жорстко закріплені два махові колеса 25 та 26, а також два ексцентрики 27 та 28, які кінематично з'єднані з ситом 29, що опирається на пружинну основу 30. В пружинній основі 30 встановлено лоток 31 для збору оброблених деталей. Сито 29 та лоток 31 розташовані під кутом до горизонтальної площини α , який слід приймати в межах $10^\circ - 20^\circ$.

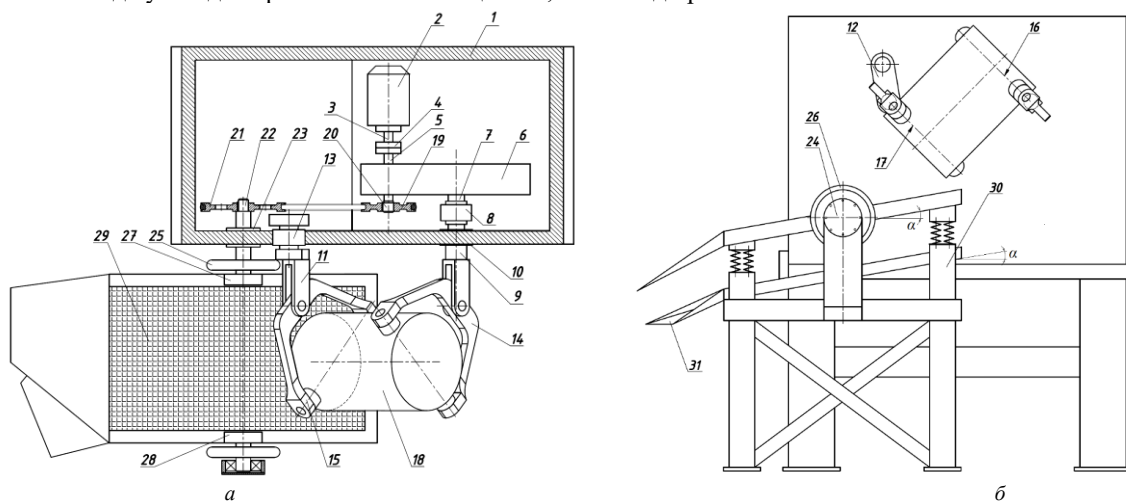


Рис. 2. Розроблена галтувальна машина: а – вид зверху, б – вид спереду

Розроблена машина може працювати в двох режимах: А та Б.

У режимі А, при увімкненні електродвигуна 2, що розташований у станині 1, вал 3 обертається проти годинникової стрілки. Крутний момент від валу 3 через фланцеву муфту 4 передається на швидкохідний вал 5. Муфта вільного ходу 20, при обертанні валу 3 проти годинникової стрілки не спрацьовує та не передає крутний момент на ведучий шків 19 пасової передачі – він нерухомий. Крутний момент від швидкохідного валу 5 передається на тихохідний вал 7, який обертається вже за годинниковою стрілкою. При обертанні за годинниковою стрілкою тихохідного валу 7 спрацьовує муфта вільного ходу 8, яка передає крутний момент на ведучий вал 9, який встановлений в підшипниковій опорі 10, та на вилку 14. Обертальний рух від вилки 14 передається на робочу ємкість 18, вилку 15, ведений вал 11. Обертання веденого валу 11 призводить до коливального руху коромисла 12, яке встановлено в підшипниковій опорі 13. Робоча ємкість 18 отримує складний просторовий рух. Таким чином, виконується основний етап процесу обробки деталей – відділення деталей від ливників.

По завершенню основного етапу процесу обробки деталей машина зупиняється вимкненням електродвигуна 2 в такому положенні (рис. 2), щоб вміст робочої ємкості 18 міг бути вільно висипаний на поверхню сита 29. Після того, як весь вміст робочої ємкості 18 (оброблені деталі та відокремлені ливники) висипаний на поверхню сита 29, машина вмикається в режим роботи Б.

У режимі Б, при увімкненні електродвигуна 2, що розташований у станині 1, вал 3 обертається за годинниковою стрілкою. Крутний момент від валу 3 через фланцеву муфту 4 передається на швидкохідний вал 5 та тихохідний вал 7 редуктора 6. Муфта вільного ходу 8, при обертанні валу 3 за годинниковою стрілкою не спрацьовує та не передає крутний момент на ведучий вал 9 – він нерухомий. Муфта вільного ходу 20, при обертанні швидкохідного валу 5 за годинниковою стрілкою спрацьовує та передає крутний момент на ведучий шків 19 пасової передачі. Крутний момент від ведучого шків 19 передається на ведений шків 21 пасової передачі. Разом зі шківом 21 обертається ексцентриковий вал 22, який встановлений в підшипникових опорах 23 та 24, махові колеса 25 та 26, а також ексцентрики 27 та 28. Обертання ексцентриків 27 та 28 призводить до вібрації сита 29, яке буде циклічно змінювати напрямок переміщення у вертикальній та горизонтальній площинах. Вібрація сита 29 буде призводити до сепарації оброблених деталей від абразивного середовища: оброблені деталі, розміри яких більші ніж отвори на ситі, будуть по похилій поверхні сита проковзувати та падати у підставлену ємкість, абразивне середовище, одиничні компоненти якого значно менші за розміри оброблених деталей, крізь отвори у поверхні сита 29 будуть потрапляти в лоток 31, звідти скочуватися в іншу ємкість. Для вільного проковзування оброблених деталей по поверхні сита 29, а також абразивних компонентів по поверхні лотка 31, слід забезпечити нахил їх поверхонь до горизонтальної площини в межах $10^\circ - 20^\circ$.

Процес повного відділення партії деталей від ливників, із використанням розробленої галтувальної машини, включає у себе такі етапи:

1. Відділення деталей від ливників у ємкості, яка виконує складний просторовий рух. Попередніми дослідженнями [14, 15] встановлено, що середня тривалість такого процесу $t_{\text{відділ.}}$ відділення партії деталей від ливників (75 кг) в барабані, залежно від типу деталей та ливників, становить від 1 до 23 хвилин безперервної роботи барабану. В середньому на дану технологічну операцію витрачається до 12 хв часу.

2. Перевантаження деталей. Оскільки розроблена машина для обробки деталей в одній конструкції поєднує галтувальну ємкість та вібраційне сито, то час вивантаження деталей на вібросито становитиме не більш ніж 2 хв технологічного часу.

3. Сепарація деталей. За один раз на вібраційному ситі можна виконати просіювання усіх оброблених деталей, тому тривалість просіювання деталей $t_{\text{сепарації}}$ через вібраційне сито, в середньому становитиме 6 хв.

За виразом (1) розрахуємо загальний час виконання повного відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників $t_{\text{заг.}}$:

$$t_{\text{заг.}} = t_{\text{відділ.}} + t_{\text{перевантаж.}} + t_{\text{сепарації}} = 20 \text{ хв} \quad (2)$$

Таким чином, загальний час на виконання даної технологічної операції з використанням розробленої машини в середньому становитиме приблизно 20 хв.

Далі виконували порівняльний розрахунок очікуваного річного економічного ефекту при можливому впровадженні розробленої галтувальної машини на ПрАТ «Молнія» для реалізації галтувальних технологічних операцій відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Вихідні дані для розрахунку представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметр	Базовий варіант	Розроблена конструкція
Об'єм барабана, м ³	0,12	0,12
Кількість робочих ємкостей на одній установці, шт.	1	1
Маса завантажених в одну установку деталей, кг	40	75
Час обробки однієї партії деталей, хв	110	20
Річний годинний фонд при однозмінній роботі, год.	1926	261
Маса оброблюваних в рік деталей на одній установці, кг	21'000	21'000
Потрібна кількість устаткування, шт.	1	1
Вартість одиниці устаткування, грн	Барабан: 280'000 Вібросито: 60'000	300'000
Потужність встановлених електродвигунів, кВт	3,8	3,0

Розраховували річний годинний фонд Γ_1 для базового процесу. Враховуючи, що підприємство працює при однозмінному режимі роботи ($K_{cm}=1$), на обробку деталей витрачається, в середньому, 110 хв часу, а в обертовий барабан завантажується 40 кг сировини.

$$\Gamma_1 = F_n \cdot K_{п.о.} \cdot K_{cm} = 2027 \cdot 0,95 \cdot 1 = 1926 \text{ год}, \quad (3)$$

де F_n – номінальний фонд часу роботи обладнання; $K_{п.о.}$ – коефіцієнт, що враховує втрати робочого часу на плановий ремонт обладнання.

$$F_n = F_k - F_p = 365 - 111 = 254 \text{ доби}; \quad (4)$$

$$F_n = F_{п.н} \cdot t_{cm} + F_{пр.н} \cdot t_{пр.см} = 249 \cdot 8 + 5 \cdot 7 = 2027 \text{ год}, \quad (5)$$

де F_k , F_p , $F_{п.н}$, $F_{пр.н}$ – відповідно, кількість календарних, вихідних та святкових, передсвяткових і повних днів ($F_k=365$; $F_p=111$; $F_{п.н}=5$; $F_{пр.н}=249$); t_{cm} та $t_{пр.см}$ – тривалість повної та передсвяткової робочої змін.

Далі розраховували річний годинний фонд Γ_2 із використанням розробленої конструкції машини при однозмінній роботі. Після впровадження машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, на обробку деталей витрачається, в середньому, 20 хв (в 5,5 разів менше ніж у базовому варіанті). За один цикл роботи машини зі складним рухом робочої ємкості можна обробити 75 кг деталей, тобто, в 1,88 разів більше ніж при обробці деталей у машині К-36 «Optilon» з обертовим барабаном, таким чином, річний годинний фонд, при однозмінній роботі становитиме:

$$\Gamma_2 = \frac{\Gamma_1}{(5,5 + 1,88)} = \frac{1926}{(5,5 + 1,88)} = 260,3 \text{ год} \quad (6)$$

Проводили розрахунок собівартості продукції по статтях витрат, що змінюються. Для базового варіанту:

Амортизаційні відрахування (15% від капітальних витрат):

$$A1 = 340'000 \cdot 0,15 = 51'000 \text{ грн} \quad (7)$$

Витрата на ремонт і обслуговування устаткування (15% від капітальних витрат):

$$P1 = 51'000 \text{ грн}. \quad (8)$$

Витрати на електроенергію:

$$E1 = M \cdot K_c \cdot \Gamma_1 \cdot \Pi = 3,8 \cdot 0,7 \cdot 1926 \cdot 1,68 = 8'607 \text{ грн}, \quad (9)$$

де M – сумарна потужність електродвигунів, $K_c=0,7$ – коефіцієнт попиту, $\Gamma_1=1926$ – річний годинний фонд (базовий варіант), $\Pi=1,68$ грн – ціна 1 кВт*год електроенергії (станом на 01.02.2021 року).

Собівартість продукції для базового варіанту:

$$C1 = A1 + P1 + E1 = 51'000 + 51'000 + 8'607 = 110'607 \text{ грн} \quad (10)$$

Із використанням розробленої галтувальної конструкції машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, амортизаційні відрахування, а також витрати на ремонт і обслуговування устаткування складатимуть:

$$A1 = P1 = 300'000 \cdot 0,15 = 45'000 \text{ грн}. \quad (11)$$

Витрати на електроенергію при експлуатації розробленої галтувальної машини становитимуть:

$$E2 = M \cdot K_c \cdot \Gamma_2 \cdot \Pi = 3,0 \cdot 0,7 \cdot 260,3 \cdot 1,68 = 918,3 \text{ грн}, \quad (12)$$

де Γ_2 – річний годинний фонд (після впровадження машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості).

Собівартість продукції після впровадження:

$$C2 = A2 + P2 + E2 = 45'000 + 45'000 + 918,3 = 90'918,3 \text{ грн} \quad (13)$$

У результаті, розраховували річний економічний ефект:

$$Ep = (C1 + E \cdot K1) - (C2 + E \cdot K2), \quad (14)$$

де $C1$, $C2$ – собівартість продукції по змінних статтях витрат до впровадження і після впровадження, відповідно; $K1$, $K2$ – капітальні витрати до впровадження і після впровадження, відповідно; $E=0,15$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності.

$$Ep = (110'607 + 0,15 \cdot 340'000) - (90'918,3 + 0,15 \cdot 300'000) = 25'688,7 \text{ грн}$$

В результаті очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості для виконання технологічних операцій відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників складе 25'688,7 грн на одну одиницю обладнання.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Розроблено галтувальну конструкцію машини типу «Turbula» зі складним просторовим рухом робочої ємкості, яка дозволяє забезпечити зручне та безперешкодне вивантаження оброблених деталей без застосування ручної праці, досягнути сепарації деталей від ливників.

2. Аналітичним шляхом виконано техніко-економічне обґрунтування використання галтувального обладнання типу «Turbula» для реалізації технологічної операції відділення металевих деталей від ливників.

3. Розраховано очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості для виконання технологічних операцій відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників складе 25'688,7 грн на одну одиницю обладнання.

Література

1. Залюбовський М.Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев. – К. : Університет «Україна», 2018. – 228 с.
2. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості : монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький, 2007. – 255 с.
3. Залюбовський М.Г. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2019. – № 5 (138). – С. 17–26.
4. Шварц А.И. Механизация и автоматизация производства формовых РТИ : учебное пособие для рабочего образования / Шварц А.И. – М. : Химия, 1987. – 176 с.
5. Шумакова Т. А. Инструмент для виброабразивной обработки деталей : монографія / Т. А. Шумакова, В. И. Шаповалов, Ю. И. Гутько ; Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. – Луганск : Ноулидж, 2011. – 59 с.
6. Willy A. Bachofen (WAB). Maschinenfabrik. 2021. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (25.12.2021).
7. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 56, No. 1, April 2020, 54–64.
8. Zaliubovskyi M. G., Panasiuk I. V., Smirnov Yu. I., Malyshev V. V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. 178, issue 4, 69–75.
9. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels. *International Applied Mechanics*, 56, No. 6, November 2020, 762–772.
10. Zalyubovs'kyi M. G., Panasyuk I.V., Koshel' S.O., Koshel' G.V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *International Applied Mechanics*, 57, No. 4, July 2021, 466–476.
11. Marigo M., Stitt E.H. Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015. No 32, P. 236–252.
12. Marigo M., Wilkinson S.K., Stitt E.H., Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Computational Particle Mechanics*. 2014. No 2. (Vol. 3), P. 283–299.
13. Zalyubovskyi M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 2 (132). P. 24–32.
14. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2020. – № 1 (142). – С. 27–38.
15. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу геометрії металевих відливок деталей замка «блискавка» на особливості їх обробки в галтувальній машині / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2020. – № 2 (144). – С. 24–32.
16. Патент № 135994, МПК B01F 11/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В. ; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – № u201902138 ; заяв. 04.03.2019, опуб. 25.07.2019, бюл. № 14.

References

1. Zaliubovskyi M.H. Mashyny zi skladnym rukhom robochych yemkosteï dlia obrobky polimernykh detaleï : monohrafiia / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev. – K. : Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.
2. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detaleï ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vztutievii ta shkirhalantereynii promyslovosti : monohrafiia / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, V.P. Konoval, I.V. Panasiuk, M.Ie. Skyba, O.M. Syniuk. – Khmelnytskyi, 2007. – 255 s.
3. Zaliubovskyi M.H. Eksperymentalne vyznachennia enerhii neobkhidnoi dlia viddilennia metalovykh detaleï vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dizaynu – 2019. – № 5 (138). – S. 17–26.
4. Shvarc A.I. Mehanizacija i avtomatizacija proizvodstva formovykh RTI : uchebnoe posobie dlja rabocheho obrazovanija / Shvarc A.I. – M. : Himija, 1987. – 176 s.
5. Shumakova T. A. Instrument dlja vibroabrazivnoj obrabotki detalej : monografija / T. A. Shumakova, V. I. Shapovalov, Ju. I. Gut'ko ; Vostochnoukr. nac. un-t im. V. Dalja. – Lugansk : Noulidzh, 2011. – 59 p.
6. Willy A. Bachofen (WAB). Maschinenfabrik. 2021. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (25.12.2021).
7. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 56, No. 1, April 2020, 54–64.

8. Zaliubovskiy M. G., Panasiuk I. V., Smirnov Yu. I., Malyshev V. V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. 178, issue 4, 69–75.
9. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels. *International Applied Mechanics*, 56, No. 6, November 2020, 762–772.
10. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I.V., Koshel S.O., Koshel G.V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *International Applied Mechanics*, 57, No. 4, July 2021, 466–476.
11. Marigo M., Stitt E.H. Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015. No 32, P. 236–252.
12. Marigo M., Wilkinson S.K., Stitt E.H., Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Computational Particle Mechanics*. 2014. No 2. (Vol. 3), P. 283–299.
13. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 2 (132). P. 24–32.
14. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta obiemu zapovnennia yemkosti na intensyvni viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*. – 2020. – № 1 (142). – S. 27–38.
15. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu heometrii metalevykh vidlyvok detalei zamka «blyskavka» na osoblyvosti yikh obrobky v haltuvalnii mashyni / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*. – 2020. – № 2 (144). – S. 24–32.
16. Patent № 135994, MPK V01F 11/00. Mashyna dlia obrobky detalei / Zaliubovskiy M.H., Panasiuk I.V. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskiy natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu – № u201902138 ; zaiav. 04.03.2019, opub. 25.07.2019, biul. № 14.

БІЛИЙ Л. А.

Хмельницький національний університет

ПОЛІЩУК О. С.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: opolishchuk71@gmail.com

ЛІСЕВИЧ С. П.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: lisevichsv@gmail.com

ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ А. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0914-0814>e-mail: zam09042020@gmail.com

МЕЛЬНИК В. І.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1173-4638>e-mail: oks81mik@i.ua

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЧУТЛИВОСТІ СИСТЕМИ ДО СВОЇХ ПОЧАТКОВИХ УМОВ

Представлено типовий підхід для побудови та аналізу моделі об'єкта. Визначено, що задачі аналізу нелінійних систем складаються з розрахунку перехідних процесів і процесів, що встановилися; визначення статичної та динамічної стійкості знайдених процесів; розрахунок чутливості вихідних характеристик системи до зміни її внутрішніх та зовнішніх параметрів. Встановлено, що ефективність аналізу в цілому визначається не тільки ефективністю алгоритмів кожного з етапів розрахунку, а і узгодженістю математичного апарату, який лежить в їх основі. Визначено, що розрахунок перехідних процесів зводиться до задачі з початковими умовами, у яких значення залежних змінних задаються для одного і того ж значення незалежної змінної, а саме часу. Визначено, що нелінійні динамічні системи, моделі яких побудовано на якісній теорії загальних диференціальних рівнянь, є основним інструментом вирішення багатьох практичних задач. Встановлено, що це пояснюється такими факторами: наявністю добре розвинутого аналітичного апарату та чисельних методів розв'язання загальних диференціальних рівнянь; прозорістю та природністю загальних диференціальних рівнянь як математичної моделі для опису процесу переходу реальних об'єктів з одного стану до іншого під дією зовнішніх та внутрішніх причин; наявністю загальнодоступних якісних методів дослідження рішень загальних диференціальних рівнянь, зокрема методів оцінки стійкості, аналізу поведінки рішень в межах особливих точок та їх асимптотичної поведінки. Зазначено обставини, які призводять до того, що системи, які описуються звичайними диференціальними рівняннями, є методично дуже зручним матеріалом для створення загальних алгоритмів дослідження динамічних систем. Побудовано математичну модель чутливості до початкових умов на основі неоднорідних диференціальних рівнянь першої варіації, що відкриває можливості для розв'язання основних задач аналізу, якими є: розрахунок перехідних процесів та процесів, що встановилися; визначення статичної стійкості та розрахунок параметричної чутливості, на основі єдиного алгоритму вирішення двоточкової Т-періодичної крайової задачі для звичайних нелінійних диференціальних рівнянь.

Ключові слова: нелінійна динамічна система, диференціальне рівняння, періодична крайова задача, метод Коші.

Leonid BILYI, Oleh POLISHCHUK,

Svitlana LISEVICH, Anatoly ZALIZETSKY, Vasilii MELNIK

Khmelnytskyi National University

MODELING OF NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS ON THE BASIS OF THE SYSTEM SENSITIVITY MODEL TO ITS INITIAL CONDITIONS

A typical approach for building and analyzing an object model is presented. It is determined that the tasks of analysis of nonlinear systems consist of: calculation of transients and established processes; determination of static and dynamic stability of the found processes; calculation of the sensitivity of the initial characteristics of the system to changes in its internal and external parameters. It is established that the efficiency of the analysis as a whole is determined not only by the efficiency of the algorithms of each of the stages of calculation, but also by the consistency of the mathematical apparatus that underlies them. It is determined that the calculation of transients is reduced to a problem with initial conditions in which the values of dependent variables are set for the same value of the independent variable, namely time. It is determined that nonlinear dynamic systems whose models are built on the qualitative theory of general differential equations are the main tool for solving many practical problems. It is established that this is explained by the following factors: the presence of a well-developed analytical apparatus and numerous methods of solving general differential equations; transparency and naturalness of general differential equations as a mathematical model to describe the process of transition of real objects from one state to another for external and internal causes; The availability of public qualitative methods of studying decisions of general differential equations, in particular methods of evaluation of stability, analysis of behavior within special points and their asymptotic behavior. The circumstances that lead to the fact that the systems described by conventional differential equations are a methodically very convenient material to create general algorithms for the study of dynamic systems. A mathematical model of sensitivity to the initial conditions is constructed on the basis of heterogeneous differential equations of the first variation, which opens up opportunities for solving the basic problems of analysis, which are: calculation of

transitional processes and processes that have been established; Determination of static stability and calculation of parametric sensitivity, on the basis of a single algorithm for solving a two-point T-periodic marginal problem for conventional nonlinear differential equations.

Keywords: nonlinear dynamic system, differential equation, periodic marginal problem, basket method.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Реальні фізичні системи, як правило, нелінійні. За своєю фізичною природою процеси в нелінійних системах складніші та багатогранніші ніж процеси в лінійних системах. Відповідно до цього аналіз нелінійних систем у математичному відношенні значно складніший у порівнянні з аналізом лінійних систем.

Основна властивість лінійної системи полягає в тому, що сума будь-яких двох її рішень є також її рішенням (принцип суперпозиції) та будь-яке рішення системи, помножене на константу також є її рішенням. Крім того, якщо лінійна система має періодичне рішення, то воно не може бути ізольованим. Тому рішення, помножене на будь-яку константу дає періодичне рішення.

В нелінійних системах може не виконуватися ні одна із зазначених властивостей. Дійсно, принцип суперпозиції не виконується і періодичні рішення можуть бути ізольовані.

Вчені з різних позицій досліджували та аналізували споріднені за своєю фізичною суттю явища у найрізноманітніших нелінійних системах, а також розглядали різні сторони цих явищ. В результаті створено значну кількість методів аналізу, які можуть бути об'єднані в групи, близькі за своєю основою, але різні за математичним оформленням.

Типовий підхід для побудови та аналізу моделі об'єкта можна представити у вигляді наступних етапів:

- аналіз процесу визначення елементарних явищ;
- створення фізичної моделі на основі опису елементарних явищ, тобто його теоретичний опис у фізичних термінах;
- представлення фізичної моделі у вигляді математичної;
- аналіз та дослідження математичної моделі;
- інтерпретація рішення у термінах фізичної моделі;
- порівняння результатів з процесом, що досліджується.

Для лінійних систем вказана методика майже повністю розроблена. У випадку нелінійних систем її розробку тільки розпочато.

Нелінійні завдання вимагають кінцевого закріплення ітераційної процедури, і зазвичай перевірки збіжності відповідної чисельної схеми, що звісно викликає певні труднощі при її вирішенні. Оскільки нелінійні задачі у своїй різноманітності мають досить значну подібність, фахівці з чисельного аналізу приклали чимало зусиль на розробку прийнятних методів розв'язання таких завдань.

Задачі аналізу нелінійних систем складаються: з розрахунку перехідних процесів і процесів, що встановилися; визначення статичної та динамічної стійкості знайдених процесів; розрахунку чутливості вихідних характеристик системи до зміни її внутрішніх та зовнішніх параметрів. Ефективність аналізу в цілому визначається не тільки ефективністю алгоритмів кожного з етапів розрахунку, а і узгодженістю математичного апарату, який лежить в їх основі.

Розрахунок перехідних процесів зводиться до задачі з початковими умовами, у яких значення залежних змінних задаються для одного і того ж значення незалежної змінної t , тобто часу. У деяких випадках доводиться вирішувати систему диференціальних рівнянь при наявності умов на значення залежних змінних, заданих для різних значень t . Подібна задача називається крайовою задачею. Методи вирішення крайових задач відрізняються від методів вирішення задач Коші.

У більшості нелінійних систем різної природи перехідні процеси мають асимптотично стійкий характер, тобто при $t \rightarrow \infty$ об'єкт переходить у певний стійкий стан. Іноді динамічний об'єкт має кілька стійких станів, тоді необхідно розрахувати декілька його статичних процесів. У зв'язку з цим важливою задачею аналізу є розрахунок статичного режиму та визначення його стійкості.

Статичний режим можна визначити, інтегруючи вихідну систему звичайних диференціальних рівнянь на достатньо великому інтервалі часу. Цей метод називається методом встановлення. Він надійний, але не завжди ефективний, так як вимагає багато часу для обчислення і у разі існування кількох статичних режимів призведе лише до одного з них.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є нелінійні динамічні системи. В ході розв'язання поставлених задач були використані основні положення загальної теорії диференціальних рівнянь.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання завданням досліджень є розробка методу розв'язку нелінійних динамічних систем на основі єдиного математичного апарату – загальної теорії диференціальних рівнянь.

Результати та їх обговорення

Нехай фізичній системі відповідає система звичайних диференціальних рівнянь n -го порядку, записана в нормальній формі, тобто у вигляді рівнянь першого порядку, вирішених відносно похідних:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = F(X, t), \quad (1)$$

де X – n -мірний вектор.

Для знаходження єдиного рішення систем з n диференціальних рівнянь першого порядку потрібно n граничних умов. Однак у більшості випадків використовують більш просту форму граничних умов. Обмежимося практично важливою проблемою визначення періодичних рішень системи (1). Обмежимо границі інтегрування (1) часовим відрізком $[t_1, t_2]$ і будемо вважати, що значення шуканих функцій відомі на межах відрізка тобто $x_i(t_1)$ і $x_i(t_2)$, $i=1,2,\dots,n$. Такі крайові умови називаються граничними і мають вигляд:

$$x_i(t_1) = x_i(t_2). \quad (2)$$

Серед безлічі крайових задач система нелінійних диференціальних рівнянь (1) та крайові умови (2) утворюють двоточкову крайову задачу. Якщо система (1) має періодичну вхідну функцію (наприклад, з періодом повторюваності T), тоді серед безлічі її рішень існують і T -періодичні. Така задача називається двоточною T -періодичною крайовою задачею, для якої граничні умови (2) записуються у вигляді співвідношення:

$$X(t) = X(t+T), \quad (3)$$

або для $t=0$

$$X(0) = X(T). \quad (4)$$

Задачу (1), (4) можна вирішити методами Коші, якщо вдасться отримати достатню кількість крайових умов на одному з кінців відрізка інтегрування, наприклад, при заданому $X(0)$ знайти $X(T)$, тобто, якщо можна отримати n шуканих функцій $x_i(t)$ в точці $t=0$ і $t=T$. Тому задача полягає у поетапному поліпшенні початкових граничних умов до тих пір, поки рішення не співпадіть. У цьому полягає сутність методу пристрілок [1].

Відомо декілька методів, які дозволяють уникнути інтегрування системи (1) протягом тривалого часу. Один з них, як показала практика, найефективніший і був використаний у [2]. Суть його полягає у тому, що інтегруючи систему (1) за деяких початкових умовах $X(0)$ протягом періоду, отримуємо вектор $X(T)$. Якщо система знаходиться в стаціонарному режимі, то $X(T) = X(0)$ та знайдене рішення є періодичним. Якщо ж ні, відзначаємо, що $X(T)$ є функцією $X(0)$ і визначаємо вектор помилок:

$$\varepsilon(X(0)) = X(0) - X(T). \quad (5)$$

Необхідно знайти таке рішення, при якому цей вектор був рівний нулю. При такій постановці задачі початкові умови стають шуканими параметрами.

Такий підхід отримав назву методу чутливості до початкових умов на відміну від параметричної чутливості, коли досліджують зміни зовнішніх і внутрішніх параметрів системи на її вихідні характеристики.

Трансцендентна система (5) нелінійна відносно n змінних $X(0)$ і може бути вирішена методом ітерацій. Найбільш придатний для цього метод Ньютона, у відповідності якого на кожній ітерації початкові умови уточнюються за формулою:

$$X^{k+1}(0) = X^k(0) - (1-W)^{-1}(X^k(0) - X(T)), \quad (6)$$

де k – індекс ітерації, а

$$W(x(0)) = \frac{\partial X(X(0), T)}{\partial X(0)} \quad (7)$$

– матриця чутливості змінних систем (1) до своїх початкових значень. Кожен рядок цієї матриці є градієнтом змінної в просторі початкових умов, а кожен її стовпчик характеризує чутливість всієї множини змінних до однієї початкової умови. Її отримують із співвідношення (5), де $\varepsilon(X(0))$ стає цільовою функцією, права частина якої при досягненні сталого процесу дорівнюватиме нулю, тобто:

$$\varepsilon(X(0)) = X(0) - X(T) = 0. \quad (8)$$

В результаті диференціювання (8) по $X(0)$ отримуємо:

$$\varepsilon'(X(0)) = 1 - \frac{\partial X(X(0), T)}{\partial X(0)} = 1 - W(X(0)) = 0, \quad (9)$$

де 1 – одинична матриця.

Елементи матриці (7) можна обчислити за допомогою різницевої формули, розв'язуючи задачу Коші та знаходячи цільову функцію (8) для однієї ітерації в загальній кількості $n+1$ разів. Через громіздкість та складність цей метод використовують рідко. Для цього зручніше використовувати диференціальні рівняння у варіаціях, які є результатом диференціювання системи (1) за початковими умовами $X(0)$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial X(X(0), T)}{\partial X(0)} = \frac{\partial F(X, t)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial X(0)}. \quad (10)$$

Позначимо:

$$A(t) = \frac{\partial F(X, t)}{\partial X}. \quad (11)$$

Враховуючи (7) та (11), система диференціальних рівнянь першої варіації набуде вигляду:

$$\frac{dW(X)(0)}{dt} = A(t) \cdot W(X(0)). \quad (12)$$

Загальноприйняту систему варіаційних рівнянь (12) інтегрувати на періоді будь-яким чисельним методом разом з вихідною системою (1), тобто елементи матриці чутливості шукають разом з вектором X . При цьому порядок системи диференціальних рівнянь зростає вдвічі, що утруднює процес розрахунку нелінійних динамічних систем.

Через незалежність вхідної функції від початкових умов система варіаційних рівнянь (12) є однорідною системою лінійних диференціальних рівнянь з періодичними коефіцієнтами. Її доцільно вирішувати окремо на підставі представлення Флоке для фундаментальної системи розв'язків системи таких рівнянь у вигляді добутку періодичної матриці періоду T та матричного рішення деякої системи з постійними коефіцієнтами. Підставою цього є теорема [3].

Теорема. Якщо $W(t)$ – фундаментальна система рішення системи диференціальних рівнянь то матриця $W(t+T)$ також є фундаментальною системою рішень. Для кожної такої фундаментальної системи $W(t)$ існує неособлива періодична матриця $D(t)$ періоду T і постійна матриця B .

$$W(t) = D(t)e^{-tB}. \quad (13)$$

Підбираємо таку постійну матрицю B , щоб матриця $W(t) = D(t)e^{-tB}$ для системи рівнянь (12) була T -періодична, тобто

$$W(t) \cdot e^{-tB} = W(t+T) \cdot e^{(t+T)B} = W(t+T) \cdot e^{-tB} \cdot e^{-TB}. \quad (14)$$

Поділивши обидві частини (14) на e^{-tB} отримаємо:

$$W(t) = D(t)e^{-TB}. \quad (15)$$

Початкові умови для варіаційних рівнянь (12) знайдемо з (9). При $t=0$ маємо:

$$W(0) = 1 \quad (16)$$

та умову періодичності можна записати так:

$$W(0) = W(T) \cdot e^{-TB}. \quad (17)$$

Підставивши формули (16) і (17), отримаємо

$$W(T) = e^{-TB}. \quad (18)$$

Для визначення матриці прологарифмуємо вираз (18):

$$B = 1/T \cdot \ln(W(T)). \quad (19)$$

Наслідком теореми Флоке є існування принаймні одного рішення рівняння (12) такого, що:

$$W(X(0), t) = W(X(0), t+T).$$

Тобто якщо функція $F(X, t)$ періодична по t з періодом T , то рішення вирішення варіаційного рівняння також періодичне з тим самим періодом.

Ляпунов А.М. у своїй роботі «Загальна задача про стійкість руху» обґрунтував доцільність дослідження стійкості розв'язків систем нелінійних диференціальних рівнянь на основі їх лінійних варіаційних рівнянь. Про це свідчить наступна його теорема, доказ якої міститься у [3].

Теорема. Якщо $X(t)$ – періодичне рішення системи (1) періоду T і функція $F(X, t)$ періодична з тим самим періодом, а характеристичні показники варіаційного рівняння (12) мають від'ємні дійсні частини, то $X(t)$ – асимптотично стійке рішення систем (1). Якщо хоча б один характеристичний показник системи (12) має додатну дійсну частину, то $X(t)$ нестійке рішення.

Отже, стійкість періодичного рішення визначатимемо виходячи з рівнянь першої варіації – моделі чутливості до зміни початкових умов. Для того щоб всі рішення (12) прямували до нуля при $t \rightarrow \infty$, необхідно і достатньо, щоб усі власні значення матриці B відповідно до (19) мали від'ємну дійсну частину, тобто, щоб усі власні значення матриці $W(X(0), T)$ були по модулю менше одиниці. Власні значення матриці W називають мультиплікаторами. Мультиплікатори не залежать від вибору початкового моменту часу t_0 .

Математичне моделювання динамічних систем зводиться до розв'язання групи задач, які належать до задач синтезу або до задач аналізу.

Аналіз системи – вивчення її властивостей. Під час аналізу не створюються нові об'єкти, а досліджуються задані.

Синтез систем націлений на створення нових варіантів об'єкта, а аналіз використовується з метою оцінки цих варіантів. Задача синтезу зазвичай зводиться до багаторазового розв'язання задачі аналізу з наступним перебором її розв'язків.

Отже, синтез та аналіз виступають у процесі проектування у діалектичній єдності.

Як було сказано на початку статті, задачі аналізу включають в себе розрахунок перехідних процесів і процесів, що встановилися та оцінку стійкості отриманих рішень і аналіз параметричної чутливості. Для вирішення кожної задачі використовують абсолютно різний математичний апарат. Задача аналізу перехідних процесів – це завдання Коші для звичайних диференціальних рівнянь. Аналіз процесів, що встановилися, здійснювався у часовій області методами гармонічного балансу, колокації тощо. Статична стійкість визначалась на підставі алгебраїчних критеріїв. Аналіз чутливості виконувався складними, в алгоритмічному відношенні, методами, тобто методом приросту, варіаційним методом, регресивним методом тощо.

Модель чутливості до початкових умов дозволяє об'єднати вирішення всіх чотирьох задач аналізу на основі схожого математичного апарату і звести їх до вирішення двоточної T -періодичної крайової задачі.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Нелінійні динамічні системи, моделі яких побудовано на якісній теорії загальних диференціальних рівнянь, є основним інструментом вирішення багатьох практичних задач. Пояснюється це такими факторами:

- наявністю добре розвинутого аналітичного апарату та чисельних методів розв'язання загальних диференціальних рівнянь;
- прозорістю та природністю загальних диференціальних рівнянь як математичної моделі для опису процесу переходу реальних об'єктів з одного стану до іншого під дією зовнішніх та внутрішніх причин;
- наявністю загальнодоступних якісних методів дослідження рішень загальних диференціальних рівнянь, зокрема методів оцінки стійкості, аналізу поведінки рішень в межах особливих точок та їх асимптотичної поведінки.

2. Зазначені обставини призводять до того, що системи, що описуються звичайними диференціальними рівняннями, є методично дуже зручним матеріалом для створення загальних алгоритмів дослідження динамічних систем.

3. Математична модель чутливості до початкових умов, побудована на неоднорідних диференціальних рівняннях першої варіації, відкриває можливості для вирішення основних задач аналізу, якими є розрахунок перехідних процесів та процесів, що встановилися, визначення статичної стійкості та розрахунок параметричної чутливості, на основі єдиного алгоритму вирішення двоточної T -періодичної крайової задачі для звичайних нелінійних диференціальних рівнянь.

Література

1. Холл Дж., Уатт Дж. Современные многочисленные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. М. : Изд-во «Мир». 1999. 311 с.
2. Aprille T.I., Trick T.N. A computer algorithm to determine the steady - state response of non linear oscialators. IEEE, Trance. Circuit Theory. 1972. Vol. CT–19. P. 354–360.
3. Коддингтон Э.А., Левинсон Н. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений. М. : Изд-во «Мир». 1995. 395 с.

References

1. Holl Dzh., Uatt Dzh. Sovremennyye mnogochislennyye metody resheniya obyknovennykh differencial'nykh uravnenij. M. : Izd-vo «Mir». 1999. 311 s.
2. Aprille T.I., Trick T.N. A computer algorithm to determine the steady - state response of non linear oscialators. IEEE, Trance. Circuit Theory. 1972. Vol. CT–19. P. 354–360.
3. Koddington Je.A., Levinson N. Teorija obyknovennykh differencial'nykh uravnenij. M. : Izd-vo «Mir». 1995. 395 s.

ПОЛІЩУК О. С.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: opolishchuk71@gmail.com

ПОЛІЩУК А. О.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: andrepol215@gmail.com

ЛІСЕВИЧ С. П.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: lisevichsv@gmail.com

ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ А. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0914-0814>e-mail: zam09042020@gmail.com

МЕЛЬНИК В. І.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1173-4638>e-mail: oks81mik@i.ua

ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ТА ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ З КОМПОЗИТНИХ НИТОК З ВИСОКИМ ВМІСТОМ МЕТАЛУ

Встановлено, що одним з найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного машинобудування є розробка нових технологій швидкого виробництва продукції (швидке виготовлення), суть яких полягає в пошаровому конструюванні виробів з порошкового матеріалу на основі CAD-моделі, тобто моделі, тривимірна геометрія якої описується у цифровому вигляді за допомогою програм твердотілого моделювання (AutoCAD, SolidWorks, Compas-3D, CATIA, ProE тощо). Наведено основні переваги використання адитивних технологій, зокрема 3D-друку філаментами з вмістом металів. Розглянуто типи 3D-принтерів, які друкують металом. Описано застосування металевих порошків в технологіях 3D-друку. Розглянуто основні характеристики та властивості таких металів титану Ti, нержавіючої сталі SS, алюмінію Al, міді Cu, заліза Fe та сплавів на їх основі, що можуть використовуватися в якості матеріалів чи добавок в адитивних технологіях. Описано переваги їх використання порівняно з традиційними технологіями (лиття, прокатка тощо). Приведено схему технологічного процесу виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу. Розглянуто та описано кожний з етапів технологічного процесу. Підібрано металевий порошок з нержавіючої сталі для виготовлення філаменту та досліджено його хімічний склад. Проведено експериментальні дослідження для визначення механічних, теплофізичних та реологічних характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення монониток для 3D-друку. На основі здійснених досліджень запропоновано використати PLA пластиковий порошок в якості з'єднуючого елемента в філаменті. Спроектовано і виготовлено конструкцію шнека для подачі матеріалу екструзійної машини. Розроблено форму та підібрано матеріал екструзійної головки, яка задає діаметр нитки, що виготовляється. Вибрано 3D-принтер для друку виробів та деталей композитними нитками з високим вмістом металу та здійснено його удосконалення. Проведено експериментальні дослідження зносу насадки екструдера 3D-принтера при контакті з абразивною ниткою.

Ключові слова: 3D-принтер, екструзійна машина, металевий порошок з нержавіючої сталі, полімерний матеріал.

Oleg POLISHCHUK, Andrii POLISHCHUK,
Svitlana LISEVICH, Anatoliy ZALIZETSKYI, Vasiliy MELNYK
Khmelnitskyi National University

THE MANUFACTURING PRODUCTS AND PARTS BY 3D-PRINTING METHOD FROM COMPOSITE FILAMENTS WITH HIGH METAL CONTENT

It is established that one of the most promising areas of development of modern engineering is the development of new technologies for rapid production (rapid manufacturing), the essence of which is the layered design of powder products based on CAD model, ie model whose three-dimensional geometry is described digitally by using solid modeling programs (AutoCAD, SolidWorks, Compas-3D, CATIA, ProE, etc.). The main advantages of using additive technologies, including 3D printing with filaments containing metals. The types of 3D printers that print metal are considered. The use of metal powders in 3D printing technologies is described. The main characteristics and properties of such metals, Ti titanium, stainless steel SS, aluminum Al, copper Cu, FE iron and alloys based on them can be used as materials or additives in additive technologies. The advantages of their use over traditional technologies (casting, rolling, etc.) are described. The scheme of technological process of manufacturing products of industry mechanical engineering by a 3D printing with a high metal content is given. Each of the stages of the technological process is considered and described. Stainless steel metal powder was selected for the manufacture of filament and its chemical composition is investigated. Experimental studies have been conducted to determine the mechanical, thermophysical and rheological characteristics of polymeric materials used for the manufacture of 3D prints. On the basis of the studies, it is proposed to use Plastic powder as a connecting element in the filament. The design of the auger for supplying the material of the extrusion machine is designed and manufactured. The form of the extrusion head is developed and selected, which sets the diameter of the

filament being made. A 3D printer for printing products and parts with a high metal content was selected and improved. Experimental studies of the wear of the 3D printer's extruder nozzle on contact with the abrasive thread.

Key words: 3D-printing, extrusion machine, stainless steel metal powder, polymer material

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним з найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного машинобудування є розробка нових технологій швидкого виробництва продукції (швидке виготовлення). Суть таких технологій полягає в пошаровому конструюванні виробів з порошкового матеріалу на основі CAD-моделі, тобто моделі, тривимірної геометрії якої описується у цифровому вигляді за допомогою програм твердотілого моделювання (AutoCAD, SolidWorks, Compas-3D, CATIA, ProE тощо).

Адитивні технології, що почали розвиватись у 80-х роках XX століття, відкриває можливість виготовлення (виросування) об'єктів шляхом поступового нанесення матеріалу на створений об'єкт. Сфера адитивних технологій сьогодні стрімко розвивається, витісняючи класичні методи обробки та виготовлення деталей [1, 2].

Основними перевагами використання адитивних технологій є:

- мінімізація матеріальних втрат і відходів виробництва;
- можливість внесення змін до проекту на етапі передачі виробу до виготовлення;
- можливість виготовлення деталей складної форми, що неможливо при використанні класичного виробництва;
- відсутність необхідності виготовлення оснастки, яка притаманна класичним методам обробки;
- виготовлення продукції в рамках дослідного виробництва;
- перехід від масового виробництва до індивідуальних замовлень і збільшення асортименту продукції.

Найближчим часом вартість продукції з використанням 3D-друку знизиться, друк стане ще популярнішим.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час виготовлення філаментів з високим вмістом металу та під час друку з них готових деталей та виробів. При вирішенні поставлених задач були використані основні положення машинознавства, теорії полімерних матеріалів і металів, та їх переробки, методології експериментальних досліджень.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка вузлів та деталей обладнання для виготовлення ниток з високим вмістом металів та готових виробів і деталей на їх основі.

Результати та їх обговорення

За останні 10 років 3D-друк металевим порошком зробив стрімкий ривок у розвитку і стає все більш популярним. Існує велика кількість матеріалів для 3D-друку металом.

Відомі сьогодні нитки для друку на основі різних металів поєднують практичні та естетичні властивості. Вони можуть відповідати вимогам різних виробів: прототипи, мініатюри, прикраси, функціональні деталі тощо.

Друк металами настільки важливий, що 3D-друк з їх використанням вже впроваджують у серійне виробництво. Деякі деталі, надруковані на 3D-принтері, вже наздогнали та певною мірою перевершили за своїми властивостями ті, що виготовляються класичними методами.

Класичне виробництво металів і пластмас є надто неощадливим. Вихід готової продукції, у деяких галузях, становить не більше 30% з використаного матеріалу. При 3D-друку з використанням металів споживається менше електроенергії, а відходи зменшуються до мінімуму. Крім того, готовий виріб, надрукований на 3D-принтері має на 60% меншу вагу у порівнянні з литою деталлю або деталлю, що піддавалась механічній обробці. Міцність і легкість деталей потрібні при виготовленні окремих виробів у різних галузях промисловості. Це, в свою чергу, також призводить до зниження собівартості продукції [3].

Процес 3D-друку металами, який сьогодні використовують найбільші компанії, відомий як оплавлення або спікання шару порошку. Це означає, що лазерний або інший високоенергетичний промінь з'єднує в єдине тіло рівномірно розподілені частки металевого порошку, створюючи шари продукту один за одним.

3D-принтери, які друкують металом, умовно поділяють на три групи:

1. Струменеві принтери, які працюють з пластиком і легкоплавкими металами, такими як свинець або олово.
 2. 3D-принтери що здійснюють друк металевим порошком з клеєм.
 3. 3D-принтери, які працюють на основі технологій лазерного плавлення.
- Металевий порошок використовується в кількох технологіях 3D-друку [4]:

- селективне лазерне спікання, SLS (Selective Laser Sintering) – 3D-метод, який використовує матеріал, що спікається лазером;
- селективне лазерне плавлення, SLM (Selective Laser Melting) – частинки металу плавляться, після чого формуються жорсткий каркас;
- електронно-променеве плавлення EBM (Electron Beam Melting). У процесі електронно-променевого плавлення металевий порошок плавиться під дією електронних променів.

Досягнення металургії повністю реалізуються в адитивному виробництві, що дозволяє використовувати унікальні матеріали і сплави для виготовлення геометрично складних виробів високої точності, щільності і повторюваності.

Метал – один із матеріалів, який успішно використовується для 3D-друку. Останнім часом виробники в значній кількості випускають порошкоподібні метали, які оптимально підходять для 3D-принтера. Сучасні технології дозволяють отримувати порошок для 3D-друку з певними властивостями для вирішення конкретних виробничих завдань. А оскільки майже будь-який метал можна розпилювати, асортимент металевих матеріалів для 3D-принтерів надзвичайно великий.

Новітні адитивні технології передбачають використання близько двадцяти перевірених і готових до використання матеріалів, серед яких титан Ti, нержавіюча сталь SS, алюміній AL, мідь Cu, залізо Fe тощо.

Ti – титан. Чистий титан (Ti64) – це метал, що найчастіше використовується для 3D-друку та є найбільш універсальним, оскільки він одночасно міцний і легкий. Використовується у різних галузях промисловості, включаючи медичну, аерокосмічну, автомобільну (для виготовлення деталей і прототипів).

Єдиним недоліком є висока реакційна здатність титану. Він може легко вибухнути, коли знаходиться у вигляді порошку. При друку порошок повинен знаходитися тільки в середовищі інертного газу аргону.

SS – нержавіюча сталь. Нержавіюча сталь є одним з найбільш доступних металів для 3D-друку. У той же час цей метал довговічний і може використовуватися в широкому спектрі промислових і мистецьких галузей. Такий тип сплаву сталі, що містить кобальт і нікель, має високу еластичність та міцність на розрив. 3D-друк таким матеріалом використовується в основному тільки у важкій промисловості.

Алюміній. Завдяки характерній алюмінію легкості та універсальності, матеріал є дуже популярним металом для використання в 3D-друку. Зазвичай його використовують у вигляді різних сплавів, де він складає основу. Алюмінієвий порошок вибухонебезпечний і використовується для друку в інертному газі аргону.

Cu – мідь. За особливим винятком, мідь та її сплави (бронза, латунь) використовуються для лиття з використанням випалених моделей, а не для прямого друку металом. Їх властивості далекі від ідеальних для використання в промисловому 3D-друку. Вони частіше застосовуються в декоративно-прикладному мистецтві. Вони додаються до пластикової нитки для 3D-друку на звичайних 3D-принтерах.

Fe – залізо. Залізо та магнітна залізна руда, в основному, використовуються як добавки до пластику PLA. Чисте залізо рідко застосовується в промисловості.

Також використовуються інструментальні, нержавіючі, жароміцні сплави, медичний кобальт-хром, а також сплави на основі алюмінію та титану тощо. Кожен метал і сплав має певні властивості. Найбільш поширеними і затребуваними є такі матеріали: титановий сплав Ti6Al4V; нікелевий сплав IN718; алюмінієвий сплав AlSi10Mg.

Ti6Al4V є найпоширенішим титановим сплавом з хорошими механічними властивостями. Вважається найтвердішим і міцним титановим сплавом. Вирізняється особливо високою складністю обробки. Має щільність 4500 кг/м³ і міцність на розрив більше 900 МПа. Сплав Ti6Al4V забезпечує незаперечні переваги щодо зниження ваги виробів у таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна та суднобудівна. Використовуються ці метали, зокрема, при виготовленні лопаток турбін, камер згоряння, а також виробів, призначених для роботи при високих температурах (до +1100 °C).

IN718 – жаростійкий високоякісний сплав, який був створений для експлуатації при температурах до +980 °C (автор і розробник Ейзельштейн).

Нікель може розчиняти багато інших металів, зберігаючи пластичність. Наявність такої властивості призвів до появи багатьох нікелевих сплавів. Сплав нікелю і хрому широко використовується в авіаційних двигунах. З нього виготовляють робочі та соплові лопатки, диски ротора турбіни, деталі камери згоряння тощо.

Найбільш термостійкими є литі сплави на основі нікелю, які витримують температури до +1100 °C протягом сотень і тисяч годин при високих статичних і динамічних навантаженнях.

Алюмінієвий сплав AlSi10Mg є ідеальним матеріалом для технології SLM та виробництва тонкостінних виробів зі складною геометрією. Це найдешевший з литих сплавів. Матеріал широко використовується в промисловості завдяки низькій щільності та хорошим антикорозійним властивостям. До його переваг можна віднести високу плинність, електро- і теплопровідність. У промисловості їх, зазвичай, використовують для виготовлення великих тонкостінних відливок складної форми.

Металеві порошки є найміцнішими матеріалами для 3D-друку. Продукція створена на тривимірних принтерах багато в чому перевершує аналоги, що виготовлені за класичними технологіями (лиття, прокатка тощо).

Одним із факторів, що стримує широке впровадження металевих порошків в адитивні технології, є висока вартість дрібнодисперсних порошків та даного обладнання.

Тривимірні металеві принтери відчутно відрізняються від звичайних принтерів, зокрема за розмірами. Пристрої для тривимірного друку навіть при відносно невеликих розмірах мають значну вагу.

Запропонована технологія виготовлення виробів з використанням філаменту, що має високий вміст металевих порошків на основі нержавіючої сталі. Для її реалізації використовуються 3D-принтери із закритою конструкційною камерою, що працюють за технологією пошарового наплавлення полімерної нитки (FDM) [5, 6]. Схема технологічного процесу виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу представлена на рис. 1 [3].

Представлена технологія складається з п'яти етапів (рис. 1):

- змішування тонкодисперсного металевого порошку та з'єднувального полімерного матеріалу;
- виготовлення нитки для 3D-друку із суміші;
- друк на 3D-принтері «зеленої» частини;
- видалення полімерного з'єднувача для отримання «коричневої» частини;
- спікання в печі та отримання готового продукту.

Сировиною для цієї технології є суміш дрібнодисперсного металевого порошку і полімерного з'єднувального матеріалу.

На першому етапі за допомогою міксера два компоненти змішуються для отримання однорідної сировини.

На другому етапі використовується екструзійна машина для отримання нитки для 3D-друку. Сировина засипається в бункер, захоплюється шнеком і подається в робочу зону корпусу екструдера. Полімер нагрівається до певної температури, розплавляється та зв'язує частинки металу між собою. Суміш подається шнеком до матриці. Шнек, що знаходиться у циліндрі дозволяє створювати тиск в зоні виходу суміші. Це змушує полімер «набухати» після виходу з екструдера. за допомогою вихідного отвору регулюємо діаметр полімерної нитки. Екстудована нитка подається через систему примусового охолодження.

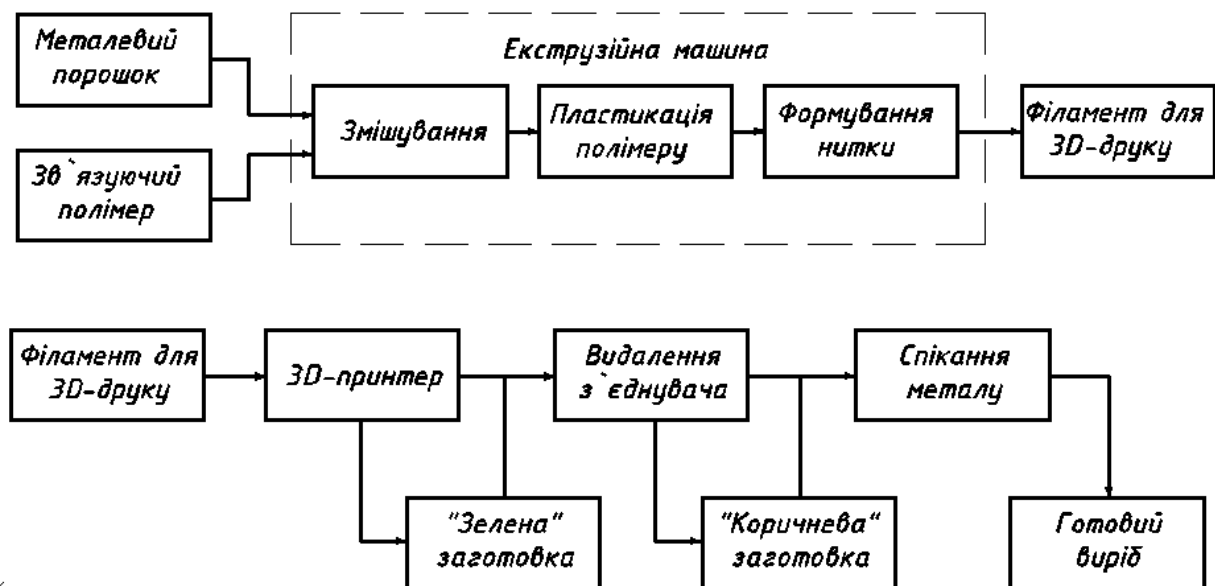


Рис. 1. Схема технологічного процесу виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу

Філамент являє собою нитку з 90-відсотковою часткою порошкового металевого наповнювача і може використовуватись у звичайному настільному 3D-принтері FDM, але з удосконаленням його певних вузлів.

На третьому етапі з полімерної нитки на 3D-принтері отримують заготовку, яку називають «зеленою» заготовкою. Використання матеріалів, наповнених металевим порошком, є більш складним завданням, ніж друк із використанням звичайних ниток. Нитки з металевим наповнювачем (особливо порошком зі сталі) дуже абразивні і вимагають принтера з удосконаленим механізмом завантаження нитки, а також іншої конструкції друкуючої головки.

На четвертому етапі з'єднувальний матеріал видаляється за допомогою розчинника, каталізаторів або термічного випалювання для отримання пористої «коричневої» заготовки.

Завершальним етапом процесу є спікання в печі металевих частинок «зеленої» заготовки. У процесі виконання цієї операції відбувається заповнення пор і ущільнення матеріалу шляхом злиття частинок без помітного збільшення розмірів кристалів (готовий виріб).

Сировиною для запропонованої технології (рис. 1) є суміш дрібнодисперсного металевого порошку та полімерного з'єднувального матеріалу.

Для отримання високоякісної продукції методом 3D-друку металеві порошки, які використовуються як наповнювачі волокна, повинні відповідати особливим вимогам – мати однорідний хімічний склад, сферичну або круглу форму з коефіцієнтом форми від 1,0 до 2,0 і вузький гранулометричний склад. Такі порошки мають кращу плинність і вищу об'ємну щільність порівняно з порошками з дендритною формою частинок, що повинно забезпечити кращу однорідність волокна для технології FDM. Порошок також повинен добре змішуватися з полімерами, спікатися до достатньо високої щільності і мати достатньо високу температуру плавлення і спікання, щоб не заважати процесу знежирення.

Для виготовлення нитки використано металевий порошок з нержавіючої сталі китайського виробника (рис. 2). Частинки металевого порошку з нержавіючої сталі досліджували за допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) для оцінки їх хімічного складу. До хімічного складу частинок нержавіючої сталі входять: залізо (Fe), хром (Cr), нікель (Ni), молібден (Mo), кремній (Si). Основними елементами цієї сталі є Fe (приблизно 65%), Cr (17%) і Ni (9%). В результаті досліджень було виявлено, що склад відповідає стандартним характеристикам нержавіючої сталі AISI 316L.



Рис. 2. Порошок з нержавіючої сталі



Рис. 3. Пластиковий порошок PLA

Використання електронного мікроскопа дозволило встановити, що цей порошок має однорідний хімічний склад, коефіцієнт форми знаходиться в межах 1,0-2,0. Форма частинок переважно сферична, а розмір частинок знаходиться в межах 20–23 мкм.

Сферичні частинки мають високу насипну щільність, краще змішуються з полімерним матеріалом і рівномірно розподіляються, що призводить до високої ступені однорідності. Така форма мікрочастинок також зменшить знос робочих частин екструзійної машини або екструдера 3D-принтера.

Невеликий розмір частинок і вузький їх розподіл за розміром підвищать щільність та покращать однорідність готового продукту після операції спікання.

Дослідження підтвердили можливість використання металевого порошку з нержавіючої сталі, який досліджувався як наповнювач волокна для 3D-друку.

Другим компонентом нитки є з'єднувальний матеріал. Металевий порошок – це те, що забезпечує структурні властивості готового продукту. Роль з'єднувача полягає виключно в забезпеченні вихідної суміші формувальної здатності та властивостей, які зберігають форму під час виготовлення виробу.

Проведені експериментальні дослідження для визначення механічних, теплофізичних та реологічних характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення монониток для 3D-друку.

Порівнюючи отримані результати досліджень різних типів полімерних матеріалів, в якості з'єднувача було запропоновано використовувати PLA пластиковий порошок (рис. 3) [7].

На першому етапі описаної технології (рис. 1) за допомогою змішувача відбувається змішування двох компонентів для отримання сировини.

На другому етапі використовується екструзійна машина для отримання нитки для 3D-друку.

Для виготовлення нитки з вищевказаних матеріалів для 3D-друку використовується машина для екструзії, що приведена на рис. 4.

Екструзійна машина складається з наступних частин: корпусу з системою нагріву (1) до необхідної температури плавлення полімеру; блоку завантаження (2), через який в порожнину корпусу надходить заздалегідь підготовлена суміш полімерних і металевих частинок нержавіючої сталі; порожнини кожуха із шнеком для переміщення сировини від вузла завантаження до формуючої насадки; гвинт; екструзійної головки, яка задає діаметр виготовленої нитки; системи охолодження та намотування філаменту; системи контролю та управління, що підтримує необхідний технологічний режим.

Завдяки тому, що до складу нитки входить металевий порошок, була спроектована і виготовлена конструкція шнека для подачі матеріалу. Також було розроблено форму екструзійної головки, яка задає діаметр філаменту, що виготовляється.

Експериментальні дослідження зносу екструзійної насадки екструдера проводилися при контакті її внутрішньої стінки з абразивною ниткою. З цією метою головка виготовлялася з різних матеріалів. За результатами проведеного експерименту встановлено, що найменше зношувалася насадка, що була виготовлена зі сталі. Тому для повноцінної роботи екструдера було запропоновано використовувати

формуючу головку екструдера із загартованої сталі E3D діаметром 1,75 мм. Виготовлення нитки при використанні формуючої латунної насадки призводило до швидкого зношування латуні. Збільшення отвору насадки призводить до збільшення діаметра філаменту, що є недопустимим для 3D-принтерів.



Рис. 4. Екструдер для виготовлення нитки з металевим наповнювачем для 3D друк

Нитка, що складається на 85% з порошку нержавіючої сталі та 15% з'єднувального полімеру, виготовляється шляхом екструдювання сировини на запропонованому обладнанні при температурі нагріву 130°C і швидкості екструзії 50 мм/хв. Екстудована нитка діаметром 1,75 мм подається через систему примусового охолодження і рівномірно намотується на котушку.

За зоною охолодження установки з допомогою оптичного приладу здійснюється перевірка відповідності діаметру екстудованої нитки.

Для друку деталей було обрано 3D-принтер 4max Pro китайської фірми AnyCubic.

Одним із чинників при виборі було те, що даний 3D-принтер має повністю закриту конструкцію. Це дозволить підтримувати температуру, необхідну для друку з використанням нитки, наповненої порошком нержавіючої сталі.

У зв'язку з тим, що філаменти з металевими наповнювачами (особливо з порошком нержавіючої сталі) дуже абразивні і потребують принтера з іншим механізмом завантаження, а також іншої конструкції друкуючої головки, було здійснено удосконалення екструдера. Удосконалення було завершено розробкою нового механізму транспортування нитки, наповненої абразивним матеріалом.

Проведені експериментальні дослідження зносу насадки екструдера 3D-принтера при контакті з абразивною ниткою аналогічні, як і формуючої головки екструзійної машини. Для повноцінної роботи принтера було запропоновано використовувати екструдер із загартованої сталі E3D діаметром 5 мм.

При подальших дослідженнях планується:

- друк «зеленої» частини з отриманої полімерної нитки на 3D-принтері;
- визначення оптимальних режимів друку «зелених» заготовок;
- видалення з'єднувача за допомогою розчинника, каталізаторів або термічним методом для отримання пористої «коричневої» заготовки;
- спікання в печі металевих частинок «зелених» заготовок;
- визначення мікроструктур нових металополімерних композитів на основі нержавіючої сталі для 3D-друку та готових виробів на основі їх оптичної та скануючої електронної мікроскопії з метою отримання

таких даних: однорідність, пористість, розмір зерна, характерний розподіл структурних компонентів, наявність неметалевих частинок тощо.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Підтверджено можливість ефективного використання філаментів з високим вмістом металів для виготовлення виробів та деталей галузевого машинобудування. Підібрано металевий порошок із нержавіючої сталі для виготовлення філаменту та досліджено його хімічний склад. Проведено експериментальні дослідження для визначення механічних, теплофізичних та реологічних характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення монониток для 3D-друку. На основі отриманих результатів запропоновано використати PLA пластиковий порошок в якості з'єднуючого елементу в філаменті. Здійснено удосконалення устаткування для виготовлення ниток з високим вмістом металу та 3D-друку готових виробів та деталей галузевого машинобудування на його основі.

Література

1. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 4. С. 102–104.
2. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Неймак В.С., Поліщук А.О. Застосування технології 3D-друку у взуттєвій промисловості. Наукові нотатки. Луцький національний університет, 2019. Випуск 67. С. 48–52.
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 390–396.
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Sorokaty R. Bydgoszcz, Poland, 2017. P. 413–421.
5. Marius A. Wagner, Amir Hadian, Tutu Sebastian, Frank Clemens, Thomas Schweizer, Mikel Rodriguez-Arbaizar, Efrain Carreño-Morelli, Ralph Spolenak. Fused filament fabrication of stainless steel structures - from binder development to sintered properties. Additive Manufacturing. Volume 49, January 2022, 102472.
6. Fábio Cerejo, Daniel Gatões, M.T. Vieira. Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 115:2449–2464.
7. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку, Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 6. С. 51–59.

References

1. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Polishchuk A.O. Prospects for the use of 3D printing in light industry. Herald of Khmelnytskyi National University, 2017. № 4. P. 102-104.
2. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Nejmak V.S., Polishchuk A.O. Application of 3D printing technology in the footwear industry. Scientific notes. Lutsk National University, 2019. Issue 67. P. 48-52.
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 390-396.
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Sorokaty R. Bydgoszcz, Poland, 2017. P. 413-421.
5. Marius A. Wagner, Amir Hadian, Tutu Sebastian, Frank Clemens, Thomas Schweizer, Mikel Rodriguez-Arbaizar, Efrain Carreño-Morelli, Ralph Spolenak. Fused filament fabrication of stainless steel structures - from binder development to sintered properties. Additive Manufacturing. Volume 49, January 2022, 102472.
6. Fábio Cerejo, Daniel Gatões, M.T. Vieira. Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 115:2449–2464.
7. Polishchuk O.S., Zozulya P.F., Polishchuk A.O. Generalized classification of filaments for 3D printing. Herald of Khmelnytskyi National University, 2017. № 6. P. 51-59.

ЯЛИНА О. О.

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6001-6272>e-mail: olga.yalina12@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІМПУЛЬСНОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Автор досліджує режими роботи імпульсного гідравлічного приводу робочих органів сільськогосподарських машин, визначає, які у них переваги та недоліки, які є типи та конструкції імпульсних гідроприводів та як вони впливають на робочий процес.

Ключові слова: імпульсний гідропривід, гідроімпульс, вібропроцес, вібротрамбовка, клапан, відмова, регулятори, пульсатор, магістраль.

Olga YALYNA

Vinnytsia National Agrarian University

RESEARCH OF OPERATING MODES OF A PULSE HYDRAULIC DRIVE OF WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINERY

Hydraulic systems are used in almost all branches of agricultural machinery. They are widely used in production - for example, in foundry machines, presses, heavy manipulators, machine tools, works, molding machines for plastics. They play an important role in the operation of equipment designed for the mining and oil industry, in rescue equipment. And, of course, one of the widest areas of application for hydraulics is various kinds of special equipment: excavators and cranes, loaders, aerial platforms, agricultural, warehouse and many other types of machines.

The use of hydraulic systems is due to a number of obvious advantages. First of all, they provide the efficiency of moving heavy loads with fine adjustment. Hydraulic systems also have great flexibility to control large and small forces. Another important benefit is reliability: equipment can be protected from overloading with simple pressure relief valves. Compared to the tasks they solve, hydraulic systems are compact and economical.

The hydraulic system of any special equipment is a rather complex and precise mechanism. The performance of the machine largely depends on its ideal operation. An analysis of the development of modern foreign mobile machines, including earth-moving, leveling, lifting and transport, for the production of concrete work and soil compaction, agricultural and forestry machines, basic wheeled tractors, etc., revealed a trend towards a growing volumetric hydraulic drive. reciprocating and rotary motion.

The author examines the modes of operation of the pulse hydraulic drive of the working bodies of agricultural machines, determines what their advantages and disadvantages, what types and designs of pulse hydraulic drives and how they affect the work process.

Keywords: pulse hydraulic drive, hydraulic pulse, vibroprocess, vibratory rammer, valve, failure, regulators, pulsator, highway.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Гідравлічні системи використовуються майже в усіх галузях промисловості. Вони широко поширені на виробництві, наприклад, в ливарних машинах, пресах, важких маніпуляторах, верстатах, роботах, формувальних машинах для пластмаси. Велику роль вони відіграють в роботі техніки, призначеної для гірничої та нафтовидобувної промисловості, рятувальному обладнанні. І, звісно, одна з найширших областей застосування гідравліки – це різного роду спецтехніка: екскаватори та підйомні крани, навантажувачі, автовишки, сільськогосподарські, складські та багато інших типів машин.

Останнім часом все більше застосування знаходить новий тип гідравлічного приводу, що характеризується наявністю гідроаккумуляторів у приводі та елементів їх розрядки (керованого по тиску) на робочу ланку, який умовно називається «гідроімпульсним». На відміну від відомого об'ємного гідроприводу з насосно-аккумуляторною станцією (НАС), де енергія в окремій дороговартісній установці накопичується на весь робочий цикл машини і передається технологічній машині, в гідроімпульсному приводі (ГІП) використовується однокерований акумулятор, що накопичує енергію тільки на один робочий хід машини, причому автоматично повторюється передача цієї енергії робочому органу і здійснюється новим елементом управління клапаном-пульсатором [1].

Виклад основного матеріалу

ГІП має властивості об'ємного і (при певних параметрах) динамічного гідроприводів, передача потенційної енергії рідини в ньому здійснюється зміною обсягів його робочих камер, взаємодією струменя рідини з робочим органом машини або обома чинниками одночасно.

Зазначені машини з ГІП характеризуються підвищеною енергоємністю і значною швидкодією, що є обов'язковими для багатьох технологічних процесів.

Залежно від способу підключення і конструктивних особливостей клапана-пульсатора розрізняють дві основні принципові схеми ГІП (рис. 1). Принципова схема ГІП з трьох-ходовим двопозиційним клапаном-пульсатором 2 (рис. 1, а) використовується у вібропресах, вібротрамбовках та інших машинах з підвищеною енергією імпульсу, швидкохідністю та більш високою вимогою до ККД. Залежно від розрахункової величини енергії одного ходу плунжера 4 заряджається однокерований акумулятор 5 від

напірної магістралі 1 до тиску p_1 , при якому клапан пульсатор 2 відкривається і забезпечує робочий хід плунжера 4 від акумулятора. У міру розрядки акумулятора 5 тиск в системі падає до p_2 , клапан-пульсатор 2 закривається, а порожнина циліндра з'єднується зі зливом, після чого під дією гідропружини 3 плунжер 4 повертається у вихідне положення. Конструкція машини може передбачати виконання корисної роботи в кінці зворотного ходу (випробувальні машини).

Принципова схема ГП, представлена на рис. 1, б, має більш простіший двоходовий клапан-пульсатор 2, встановлений в зливній лінії з порожнини циліндра плунжера робочої ланки 3. Рідина по напірній магістралі 1 подається безпосередньо в порожнину циліндра і переміщує робочу ланку 3 вгору. При тиску p_1 клапан-пульсатор 2 з'єднує магістраль 1 зі зливом. Повернення робочого органу у вихідне положення при відкритому клапані пульсатора відбувається під дією пружини 5 або ваги ударних частин робочої ланки 3. Тиск в системі падає, припиняється витрата зливу, і клапан-пульсатор 2 закривається.

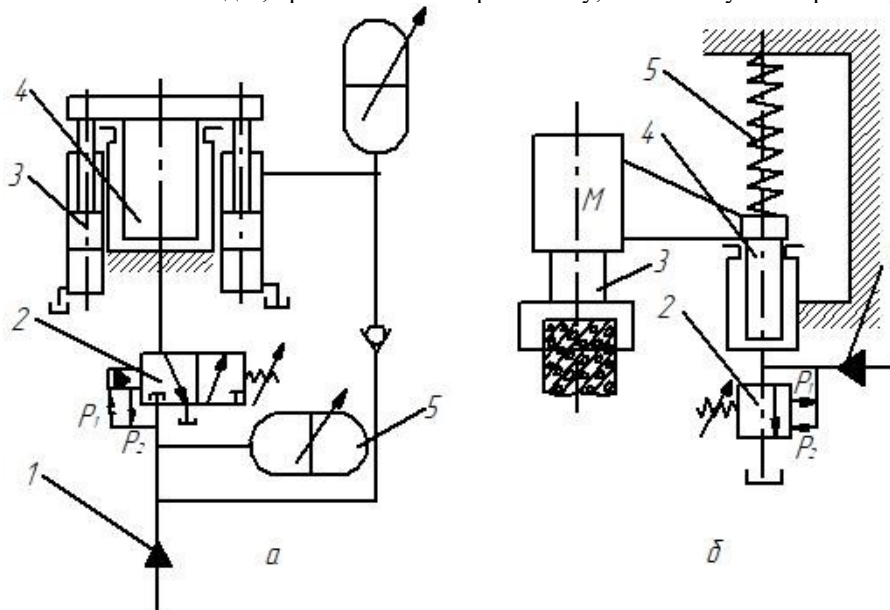


Рис. 1. Принципові схеми ГП, з трьох (а) і двоходовим (б) клапанами-пульсаторами

В даній схемі відсутній акумулятор в тому вигляді, в якому він зображений на рис. 1, а. Роль акумулятора енергії виконує пружина 5 (рис. 1, б) або висота положення ударних частин. Схема ГП, представлена на рис. 1, б, використовується в швидкохідних ковальсько-штампувальних молотах.

Найбільш наочно ілюструють роботу елементів розрядки найпростіші клапани-пульсатори. На рис. 2 представлені дво- і триходові двопозиційні клапани-пульсатори. При досягненні в системі тиску p_1 (рис. 2, а), що визначається зусиллям натяжки пружини $1P_{np} = p_1 f$, кулька 2 зміститься вгору і на нього буде діяти сила $P_1 \square P_{np} (P_1 = p_1 F)$. Сила, що діє на кульку 2, збільшиться від P_{np} до P_1 імпульсно і перемістить його вгору на величину, більшу розміру Δ , таким чином, що напірна магістраль з порожниною робочого циліндра з'єднаються зі зливом. Тиск в системі падає зі швидкістю, яка визначається умовним проходом клапана, і при досягненні величини p_2 настає рівновага $p_1 f = p_2 F$, коли будь-яке зменшення тиску нижче p_2 (зазвичай визначається втратами в зливній магістралі при зворотному ході робочого органу) викличе посадку кульки 2 на сидло під дією наслідку зусилля натяжки пружини 1.

Триходовий двопозиційний клапан-пульсатор (рис. 2, б) аналогічний за принципом дії двоходовому. При зарядці акумулятора 3 штовхач 2 переміщує золотник 1 до тих пір, поки не буде перекрито виточення С, а виточення Ц не з'єднається з виточенням Н. Одночасно порожнина А з'єднається з Н, що призведе до швидкого переключення золотника 1 в положення розрядки акумулятора на робочий циліндр (виточення Ц).

Акумулювання енергії в ГП здійснюється в пружинних і чисто гідравлічних акумуляторах. Принцип дії пружинних акумуляторів широко відомий. Чисто гідравлічні акумулятори застосовуються нечасто, і їх робота вимагає деякого пояснення, так як ґрунтується на стисливості рідини. Енергія, накопичена за рахунок стиснення рідини, визначається по відомій залежності [2]:

$$A = 0,5(p_1^2 - p_2^2)W_0\beta, \quad (1)$$

де p_1 – найбільший тиск в гідроаккумуляторі; p_2 – тиск при закритому клапані-пульсаторі; W_0 – первинний об'єм порожнини гідроаккумулятора; β – коефіцієнт стисливості рідини (при розрахунках приймається $\beta \approx \text{const}$ для тисків понад 3 МПа).

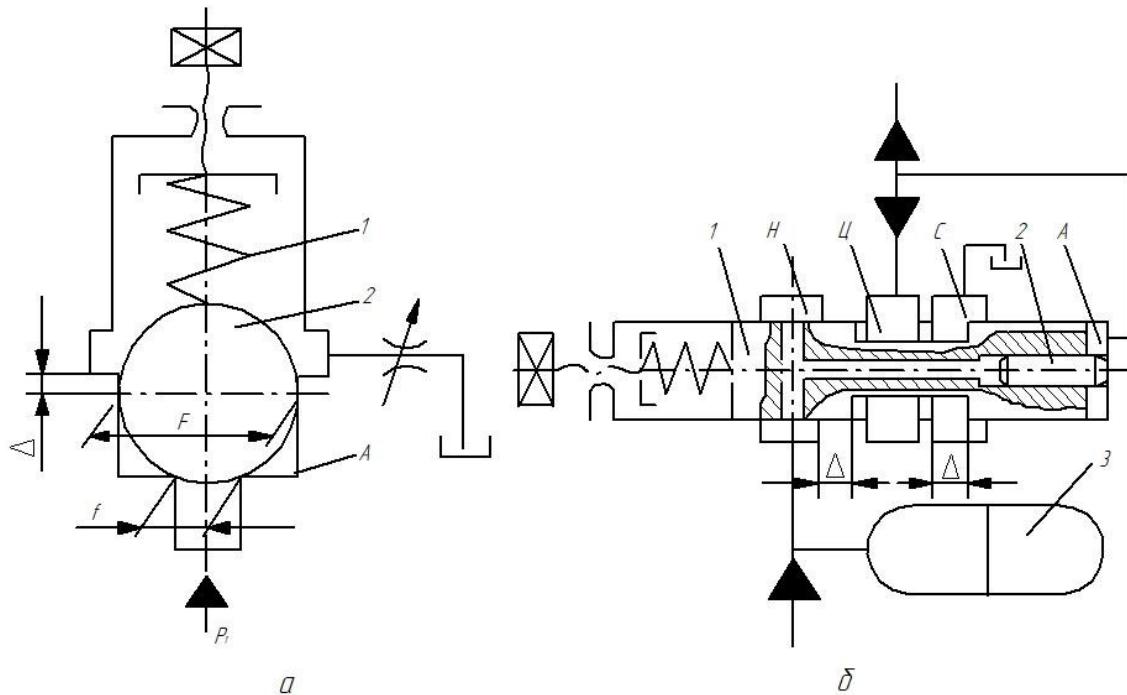


Рис. 2. Конструктивні схеми двох (а) і триходового (б) клапанів-пульсаторів

Миттєва потужність ГПП визначається часом вчинення одного робочого ходу t_p , а його мінімальне значення залежить від швидкодії клапана-пульсатора t_k ($t_k \leq t_p$). Величина середньої миттєвої потужності за один імпульс $N_{МГН}$, і час робочого ходу з достатнім ступенем точності для проектних розрахунків визначається із залежностей:

$$N_{МГН} = p_1^2 W_0 \beta / 2t_p \quad (2)$$

$$t_p = \sqrt{2mS_0 / p_{cp} F}, \quad (3)$$

де m – маса рухомої робочої ланки машини; робочий хід; p_{cp} – середній тиск за час циклу (приймається його середньоарифметичне значення) [3].

Гранична частота роботи таких приводів (відповідає числу подвійних ходів робочої ланки машини), наприклад для чисто гідралічного акумулювання:

$$n = \frac{1}{t_u} = \frac{1}{2A_x \dot{f} Q_n p_{cp} + t_k} \approx \frac{0,9 Q_n p_1}{2A_x} \quad (4)$$

де 0,9 – коефіцієнт, що враховує час спрацювання клапана пульсатора; $Q_n = \text{const}$ – подача насоса; A_x – задана енергія одного робочого ходу. Експерименти показали достатню точність + (7-10%) при використанні залежності (4).

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Таким чином, для швидкодіючих машин, які споживають значну миттєву потужність, досить ефективний і простий в експлуатації і виготовленні імпульсний гідропривід з одно-ходовим акумулятором і клапаном-пульсатором дистанційного безступінчастого управління та автоматично повторюваними подвійними ходами робочої ланки. Успішно працюють у виробничих умовах приводи описаного типу з установочною потужністю до 30 кВт та миттєвою потужністю до 200 кВт при частоті імпульсів до 30 Гц. Лабораторно отримані частоти до 150 Гц з установочними потужностями 14 кВт.

Література

1. Руденко Т.В. об'ємний гідропривід [Електронний ресурс] / Руденко Т.В., Ковальчук Н.В., Ю.В. Кулешков. – Кіровоград : КНТУ, 2014. – Режим доступу : <https://core.ac.uk/download/pdf/158807339.pdf>
2. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини та гідропривід / В. Р. Кулінченко. – Київ : Фірма «ІНКOS», 2006. – 616 с.
3. Розрахунок об'ємного гідропривода подачі подрібнювача деревних відходів з автоповерненням при перевантаженні [Електронний ресурс] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – 2019. – Режим доступу : <http://gm.khpi.edu.ua/article/view/2411-3441.2019.1.05>.

References

1. Rudenko T.V. obiemnyi hidropriyvid [Elektronnyi resurs] / Rudenko T.V., Kovalchuk N.V., Yu.V. Kulieshkov. – Kirovohrad : KNTU, 2014. – Rezhym dostupu : <https://core.ac.uk/download/pdf/158807339.pdf>
2. Kulichenko V. R. Hidravlika, hidravlichni mashyny ta hidropriyvid / V. R. Kulichenko. – Kyiv : Firma «INKOS», 2006. – 616 s.
3. Rozrakhunok obiemnoho hidropriyvoda podachi podribniuvacha derevnykh vidkhodiv z avtopovernenniam pry perevantazhenni [Elektronnyi resurs] // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty. – 2019. – Rezhym dostupu : <http://gm.khpi.edu.ua/article/view/2411-3441.2019.1.05>.

ЯНИШЕВСЬКИЙ В. Ю.

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4467-6654>e-mail: vasyl.yuriovych@gmail.com

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ОБ'ЄМНОГО ГІДРОПРИВОДА

У статті розглядаються основні принципи дії об'ємного гідропривода, які значення та показники на них впливають. Проаналізувати основні принципи та визначити цілі, які стосуються основних відомостей про гідрооб'ємні приводи, пристрої та принцип дії гідромеханізмів і гідроапаратів, складання принципових гідравлічних схем, послідовності розрахунку гідроприводу та вибору гідроелементів. Після проведеного аналізу визначаються енергетичні можливості гідроприводу, які характеризуються його потужністю.

Ключові слова: гідравлічний привід, технічна діагностика, експертна оцінка, енергетичні можливості, баланс, потужність, передаточне відношення.

Vasyl YANISHEVSKYY

Vinnytsia National Agrarian University

BASIC PRINCIPLES OF OPERATION AND ENERGY BALANCE OF VOLUME HYDRAULIC DRIVE

Scientific and technological progress in mechanical engineering is inextricably linked with the development and creation of new, more productive, more efficient equipment and the improvement of the designs of existing machines and equipment. The technical level of machines is largely determined by the perfection of the power flow drive to their working bodies. In this case, an important role is given to drives, in which the energy carrier is liquid. Such drives are called hydraulic or hydraulic drives. The use of hydraulic drives allows you to create progressive designs of machines, expand the possibilities of mechanization and automation of technological processes, to facilitate the working conditions of operators, to improve the culture of material production.

Currently, hydraulic actuators are successfully used in almost all areas of industrial production, including in the construction, road, and municipal engineering industries. Small overall dimensions and weight with a significant generated power, high overload capacity in terms of power and torque, the ability to provide sufficiently large gear ratios and stepless speed control of the output link, easy reversibility, which ensures high speed and accuracy of processing control actions, the availability of automation - these are the main advantages of the hydraulic drive, which predetermine its wide application in the construction of transport and technological machines.

The article defines the basic principles of the volumetric hydraulic drive, what values and indicators affect them. A goal has been defined regarding basic information about hydrostatic drives, devices and the principle of operation of hydraulic mechanisms and hydraulic devices, drawing up hydraulic circuit diagrams, the sequence of calculating a hydraulic drive and choosing hydraulic elements. The energy capabilities of the hydraulic drive, characterized by its power, are also determined.

Keywords: hydraulic drive, technical diagnostics, expert assessment, energy capabilities, balance, power, gear ratio.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Гідравлічні приводи виникли досить давно, але інтенсивно стали розвиватися лише у ХХ ст. Сучасну історію свого розвитку гідропривід веде з корабельних механізмів, зокрема з механізмів кермового управління та повороту гарматних веж. Потім гідропривід знайшов застосування в металорізальних верстатах, авіаційній техніці тощо [1].

В даний час гідроприводи успішно використовуються практично у всіх сферах промислового виробництва, у тому числі у галузі будівельного, дорожнього, комунального машинобудування.

Малі габаритні розміри і маса при значній потужності, що виробляється, велика перевантажувальна здатність по потужності і моменту, можливість забезпечення досить великих передавальних чисел і безступінчастого регулювання швидкості вихідної ланки, легка реверсивність, що забезпечує високу швидкодію і точність відпрацювання керуючих впливів, доступність автоматизації – це ті основні переваги гідравлічного приводу, які визначають його широке застосування в конструкціях транспортних та технологічних машин [2].

До суттєвих недоліків гідроприводу в порівнянні з механічним та електроприводами слід віднести менше значення коефіцієнта корисної дії (0,6-0,8), залежність характеристик гідроприводу від параметрів робочого тіла – рідини, можливість зовнішніх та внутрішніх витоків робочої рідини, вищі вимоги до точності виготовлення деталей та складання гідроагрегатів, досить жорсткі вимоги до культури технічного обслуговування та ремонту.

Виклад основного матеріалу

Принцип дії об'ємного гідроприводу ґрунтується на високому значенні об'ємного модуля пружності рідини та на законі Паскаля. Для пояснення принципу дії та з'ясування основних залежностей гідроприводу розглянемо схему на рис. 1. Схема включає дві гідравлічні машини у вигляді герметичних циліндрів 1 і 2, послідовно з'єднаних гідролінією 3.

Циліндр 1 є насосом (вхідною ланкою), циліндр 2 – гідродвигуном (вихідною ланкою). Поршень першого циліндра навантажений силою T_1 , поршень другого – зовнішнім навантаженням T_2 .

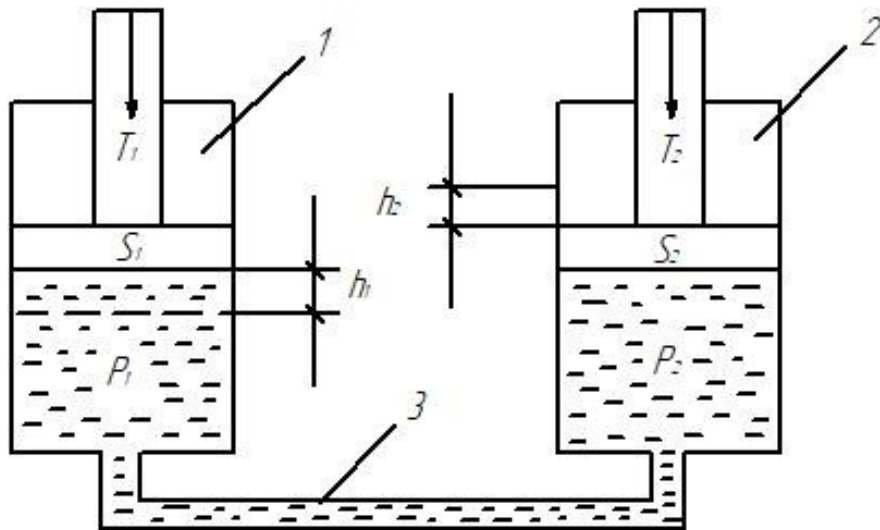


Рис. 1. Принципова схема об'ємного гідроприводу

При переміщенні поршня циліндра 1 вниз рідина з нього витісняється в циліндр 2, приводячи поршень в рух. У гідроциліндрах та гідролінії встановиться гідростатичний тиск, величина якого без урахування втрат буде рівна:

$$P_1 = \frac{T_1}{S_1} = \frac{T_2}{S_2} = P_2 = P, \quad (1)$$

де S_1 і S_2 – площі першого та другого циліндрів відповідно.

Отже, тиск у гідроприводі визначається навантаженням, а сила, що розвивається на поршні циліндра 2 надає руху гідродвигуна, долаючи навантаження і здійснюючи корисну роботу. За відсутності навантаження на гідродвигун тиск дорівнює нулю [3].

$$T_2 = P \cdot S_2 \quad (2)$$

На підставі (1) можна записати:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{S_2}{S_1} = i_c, \quad (3)$$

де i_c – силове передавальне відношення гідроприводу.

У разі повної герметичності циліндрів і трубопроводу, що з'єднує їх, нестисливості рідини, відсутності деформації циліндрів справедлива рівність:

$$h_1 S_1 = h_2 S_2 \quad (4)$$

де h_1 і h_2 – переміщення поршнів циліндрів 1 та 2 відповідно.

Вважаючи, що переміщення поршнів відбувається рівномірно за час t , отримаємо:

$$\frac{h_1 \Delta S_1}{t} = \frac{h_2 \Delta S_2}{t} \text{ чи } \vartheta_1 S_1 = \vartheta_2 S_2 \quad (5)$$

Звідси:

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{S_1}{S_2} = i_k \quad (6)$$

де i_k – кінематичне передавальне число гідроприводу.

На підставі (5) швидкість вихідної ланки гідроприводу дорівнюватиме [4]:

$$\vartheta_2 = \frac{\vartheta_1 S_1}{S_2} = \frac{Q_1}{S_2} = \frac{Q_2}{S_2} \quad (7)$$

де Q_1 – подача насоса, Q_2 – витрати гідродвигуна.

З отриманих залежностей випливає, що витрата рідини забезпечує швидкісні показники приводу, а тиск – силові.

Енергетичні можливості гідроприводу характеризуються його потужністю. Потужність на вході та виході гідроприводу, згідно з рис. 1 визначається з виразів:

$$\begin{aligned} N_{\text{ex}} &= T_1 \Delta \mathcal{Q}_1 = P_1 \Delta S_1 \Delta \mathcal{Q}_1 = P_1 \Delta Q_1, \\ N_{\text{вих}} &= T_2 \Delta \mathcal{Q}_2 = P_2 \Delta S_2 \Delta \mathcal{Q}_2 = P_2 \Delta Q_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді баланс потужності у приводі можна подати у вигляді:

$$N_{\text{ex}} = N_{\text{вих}} + \Delta N \quad (9)$$

де ΔN – втрати потужності в гідроприводі.

Втрати потужності в гідроприводі складаються з об'ємних ΔN_0 , механічних ΔN_M і гідравлічних втрат ΔN_Γ :

$$\Delta N = \Delta N_0 + \Delta N_M + \Delta N_\Gamma. \quad (10)$$

Потужність об'ємних втрат дорівнює:

$$\Delta N_0 = P \cdot \Delta Q,$$

де ΔQ – витрата зовнішніх та внутрішніх витоків рідини в елементах гідроприводу, що впливає на об'ємний ККД:

$$\eta_0 = \frac{Q_{\text{вих}}}{Q_{\text{ex}}} = \frac{Q_{\text{ex}} - \Delta Q}{Q_{\text{ex}}} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_{\text{ex}}}, \quad (11)$$

де Q_{ex} – витрата рідини, що надходить у гідропривод; $Q_{\text{вих}}$ – витрата рідини, що спрямовується на злив.

Об'ємні втрати проявляються у зниженні швидкісних параметрів гідроприводу. Так, якщо позначити теоретичну швидкість вихідної ланки гідроприводу через \mathcal{Q}_T , то його дійсна швидкість дорівнюватиме [5]:

$$\mathcal{Q}_\partial = \mathcal{Q}_T \Delta \eta_0. \quad (12)$$

Потужність механічних втрат визначають за формулою:

$$\Delta N_M = \mathcal{Q} \cdot \Delta T, \quad (13)$$

де ΔT – зусилля в гідроприводі, що визначають механічний ККД гідроприводу.

$$\eta_M = \frac{N_{\text{ex}} - \Delta N_M}{N_{\text{ex}}} = 1 - \frac{\Delta N_M}{N_{\text{ex}}}. \quad (14)$$

Механічні втрати призводять до зниження силових параметрів гідроприводу, так як дійсне значення зусилля на вихідній ланці гідроприводу T_∂ завжди менше теоретичного значення T_m на величину втрат на тертя, тому:

$$T_\partial = T_T \Delta \eta_M \quad (15)$$

Основним джерелом гідравлічних втрат у гідроприводі є розгалужена гідромережа. Потужність гідравлічних втрат визначають за виразом [6]:

$$\Delta N_\Gamma = Q \sum P_n, \quad (16)$$

де $\sum P_n$ – сумарні втрати тиску в гідромережі, які визначають значення гідравлічного ККД гідропривода:

$$\eta_\Gamma = \frac{P_{\text{НОМ}} - \sum P_n}{P_{\text{НОМ}}}, \quad (17)$$

де $P_{\text{НОМ}}$ – номінальний тиск рідини в гідроциліндрі.

Загальний ККД гідропривода буде дорівнювати:

$$\eta = \eta_0 \Delta \eta_M \Delta \eta_\Gamma = \frac{N_{\text{вих}}}{N_{\text{ex}}} = 1 - \frac{\Delta N}{N_{\text{ex}}} \quad (18)$$

звідси випливає:

$$N_{\text{вих}} = \eta N_{\text{ex}}, \quad N_{\text{ex}} = \frac{1}{\eta} N_{\text{вих}}. \quad (19)$$

Тоді потужність приводного двигуна гідроприводу визначиться з виразу:

$$N_{\text{пр}} = \frac{1}{\eta_\Pi} N_{\text{ex}}, \quad (20)$$

де η_Π – ККД передачі між приводним двигуном та гідронасосом.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті розглянуті основні принципи дії об'ємного гідропривода, які значення та показники на них впливають. Визначенні цілі, які стосується основних відомостей про гідрооб'ємні приводи, пристрої та принцип дії гідромеханізмів і гідроапаратів, складання принципових гідравлічних схем, послідовності розрахунку гідроприводу та вибору гідроелементів. Після проведеного аналізу визначено енергетичні можливості гідроприводу, які характеризуються його потужністю.

Література

1. Захарова Н.С. Гидравлика, гидравлические машины и основы гидропривода : навч. посібник / Захарова Н.С. – Череповец : Вид-во ЧГУ, 2004. – 215 с.
2. Бутовский М.Е. Технические жидкости : навч. посібник / Бутовский М.Е. – Рубцовск : Вид-во Рубцовского индустриального ин-та, 2005. – 103 с.
3. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривод : підручник / Кулінченко В. Р. – К. : Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. – 616 с.
4. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі / [В.А. Дідур, О.Д.Савченко, Д.П. Журавель, С.І. Мовчан]. – К. : Аграрна освіта, 2008. – 577 с.
5. Онищенко О.Г. Розрахунок параметрів об'ємного гідроприводу робочих органів розчинозмішувачів типу ашг-4 / О.Г. Онищенко, С.В. Попов, В.В. Вірченко // Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – 2010. – С. 23–28.
6. Малаков О.І. Зниження навантаження елементів конструкції моста керованих коліс самохідної косарки шляхом раціональної установки гідроциліндрів / О.І. Малаков, С.А. Бурлака, Р.О. Ярошук // Вник Хмельницького національного університету Серія: Технічні науки. – 2018. – № 4 (263). – С. 56–61.

References

1. Zaharova N.S. Gidravlika, gidravlicheskie mashiny i osnovy gidroprivoda : navch. posibnik / Zaharova N.S. – Cherepovec : Vid-vo ChGU, 2004. – 215 s.
2. Butovskiy M.E. Tekhnicheskyye zhydkosty : navch. posibnyk / Butovskiy M.E. – Rubtsovsk : Vyd-vo Rubtsovskoho yndustryalnoho yn-ta, 2005. – 103 s.
3. Kulichenko V. R. Hidravlika, hidravlichni mashyny i hidropriyvod : pidruchnyk / Kulichenko V. R. – K. : Firma «Inkos», Tsentr navchalnoi literatury, 2006. – 616 s.
4. Hidravlika ta yii vykorystannia v ahropromyslovomu kompleksi / [V.A. Didur, O.D.Savchenko, D.P. Zhuravel, S.I. Movchan]. – K. : Ahrarna osvita, 2008. – 577 s.
5. Onyshchenko O.H. Rozrakhunok parametriv obiemnoho hidropriyvodu robochykh orhaniv rozchynozmishuvachiv typu ashg-4 / O.H. Onyshchenko, S.V. Popov, V.V. Virchenko // Poltavskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Yuriia Kondratiuka. – 2010. – S. 23–28.
6. Malakov O.I. Znyzhennia navantazhennia elementiv konstruktсии mosta kerovanykh kolis samokhidnoi kosarky shliakhom ratsionalnoi ustanovky hidrotsylindriv / O.I. Malakov, S.A. Burlaka, R.O. Yaroshchuk // Vsnik Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu Serii: Tekhnichni nauky. – 2018. – № 4 (263). – S. 56–61.

БУРБЕЛО М. Й.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4510-2911>e-mail: burbelomj@gmail.com

ЛЕБЕДЬ Д. Ю.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7482-9741>e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com

ЛЕЩЕНКО О. Р.

Вінницький національний технічний університет

e-mail: sasha.leshchenko@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ ЗАРЯДУ/РОЗРЯДУ КОНДЕНСАТОРІВ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ПІД ЧАС КОЛИВАНЬ НАПРУГИ

Розроблено регулятор напруги на конденсаторах для схеми керування паралельним активним фільтром на основі dq-теорії з блоком ковзного усереднення струму в колі керування струмом i_d . Він містить блок затримки, цифровий фільтр нижніх частот першого порядку FIR або IIR (в залежності від варіанту розглянутої схеми) та блок «sgn», що стабілізує вихідний сигнал. Схему керування напругою на конденсаторі можливо реалізувати повністю в цифровому варіанті обробки сигналу та використовувати замість аналогового PID регулятора, що набагато ефективніше за необхідності адаптації схеми до режиму навантажень. Більшість аналогових фільтрів страждають від фазових спотворень, коли сигнали на різних частотах затримуються на різну величину. Хоча це все ще присутнє в цифрових IIR-фільтрах. FIR-фільтри зазвичай розроблені як «лінійна фаза»; це означає, що фільтр не має фазових спотворень. Фазові спотворення виникають через те, що сигнали різної частоти затримуються по-різному при перетині фільтра. Для IIR фільтрів необхідно введення додаткового коефіцієнта, який буде регулювати групову затримку, протягом якої фільтр затримує сигнал певної частоти. Якщо ви робите те ж саме для FIR-фільтра, ви побачите пряму горизонтальну лінію, це означає, що всі сигнали затримуються на однакову величину, що добре та забезпечить кращу якість сигналу. Блок «sgn» не впливає на процес підтримання напруги на конденсаторах та швидкість перехідних процесів, його роль полягає у посиленні компенсаційної здатності регулятора напруги за допомогою фільтрації цифрового сигналу. Вибраний фільтр, за допомогою автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі забезпечує стабільний процес заряду/розряду конденсатора і високий рівень компенсації вищих гармонік без значної додаткової генерації активної потужності в мережу. При використанні в контексті аналогових систем реального часу цифровий фільтр іноді має проблематичну затримку (різниця в часі між входом і виходом), що пов'язано з аналого-цифровим та цифро-аналоговим перетворенням та згладжуванням. Показано, що за допомогою оптимізації часу заряду/розряду конденсатора силового активного фільтра можна досягти мінімальної тривалості перехідного процесу за мінімальних значень гармонічних спотворень.

Ключові слова: електрична мережа, вищі гармоніки, реактивна потужність, силовий активний фільтр, регулятор напруги, блок затримки, цифровий фільтр.

Mykhailo BURBELO, Denys LEBED, Oleksandr LESHCHENKO

Vinnytsia National Technical University

OPTIMIZATION OF CHARGE / DISCHARGE TIME OF ACTIVE FILTER CAPACITORS DURING VOLTAGE FLUCTUATIONS

A voltage regulator on capacitors has been developed for the control circuit of a parallel active filter based on dq-theory with a block of sliding averaging current in the current control circuit i_d . It contains a delay unit, a digital low-pass filter of the first order FIR or IIR (depending on the variant of the considered scheme) and the unit "sgn", which stabilizes the output signal. The voltage control circuit on the capacitor can be implemented entirely in digital signal processing and used instead of the analog PID controller, which is much more effective if you need to adapt the circuit to the load mode. Most analog filters suffer from phase distortion when signals at different frequencies are delayed by different amounts. Although it is still present in digital IIR filters. FIR filters are usually designed as a "linear phase", which means that the filter has no phase distortion. Phase distortions occur due to the fact that signals of different frequencies are delayed differently when crossing the filter. For IIR filters, it is necessary to enter an additional factor that will regulate the group delay, during which the filter will delay the signal of a certain frequency. If you do the same for the FIR filter, you will see a straight horizontal line, which means that all signals are delayed by the same amount, which is good and will provide better signal quality. The unit "sgn" does not affect the process of maintaining the voltage on the capacitors and the speed of transients, its role is to enhance the compensatory capacity of the voltage regulator by filtering the digital signal. The selected filter, by automatically stabilizing the voltage on the capacitor provides a stable charge / discharge process of the capacitor and a high level of compensation of higher harmonics without significant additional generation of active power in the network. When used in the context of real-time analog systems, the digital filter sometimes has a problematic delay (input-output time difference) due to analog-to-digital and digital-to-analog conversion and smoothing. It is shown that by optimizing the charge / discharge time of the capacitor of the power active filter it is possible to achieve the minimum duration of the transient process with the minimum values of harmonic distortions.

Keywords: electric network, higher harmonics, reactive power, active power filter, voltage regulator, delay unit, digital filter.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Впровадження напівпровідникової техніки в електроенергетику загострило проблему якості електричної енергії у зв'язку зі збільшенням вищих гармонік струму і напруги. Такі пристрої, як тиристорні регулятори напруги, керовані випрямлячі, перетворювачі частоти і автономні інвертори напруги генерують гармоніки, частоти яких перевищують 1 кГц.

Для покращення показників якості електричної енергії та зменшення впливу вищих гармонік все частіше використовують силові активні фільтри (САФ) [1, 2]. Ефективність роботи САФ за різко змінних навантажень значною частиною визначається автоматичним регулятором підтримання напруги на конденсаторах [3, 4].

В [5] розроблено пристрій регулювання напруги на конденсаторах, в якій поєднуються аналогова та цифрова реалізації.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: покращення якості електроенергії за рахунок підвищення швидкодії пристрою регулювання напруги на конденсаторах активного фільтра з використанням цифрової реалізації.

Результати досліджень

Система керування САФ для компенсації вищих гармонік та реактивної потужності була змодельована в середовищі *Simulink* пакету прикладних програм *Matlab* (рис. 1). Система керування складається з таких блоків: блоків прямого та зворотного перетворення струмів та напруг з системи фазних координат в систему координат миттєвих симетричних складових $abc/\alpha\beta 0$ та $\alpha\beta/dq$ [2], блока формування струму компенсації, регулятора напруги на конденсаторах.

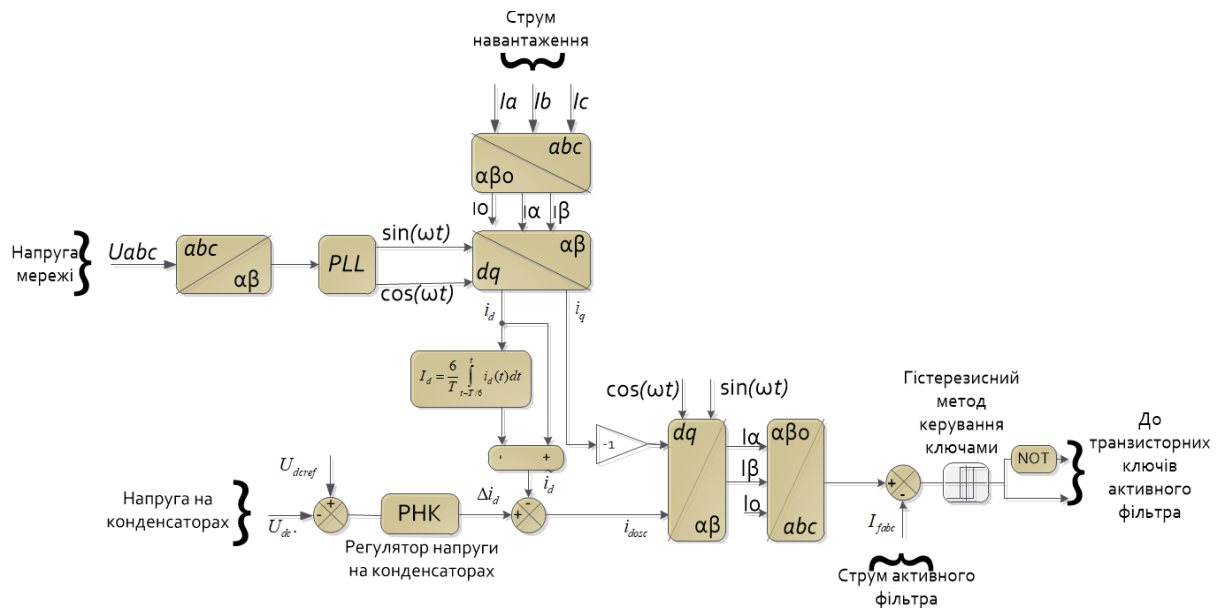


Рис. 1. Функціональна схема системи керування САФ

Для моделювання роботи САФ в режимі компенсації реактивної потужності використана модель з трифазним нелінійним навантаженням і додатковим трифазним навантаженням [6]. Характеристика елементів дослідної моделі: опір системи живлення $18.4+j17.1$ мОм, опір на стороні постійного струму нелінійного навантаження (випрямляч, схема Ларіонова) – $12+j1,256$ Ом, опір симетричного трифазного навантаження – $10+j10$ Ом, опір трифазного накиду навантаження – $5+j3$ Ом. Індуктивність, яка ввімкнена послідовно з фільтром $L = 2,2$ мГн. Два конденсатори, що ввімкнені послідовно та мають параметри: ємність $C = 4000$ мкФ, напруга $u_{dc} = 300$ В, $u_{dcref} = 600$ В. Накид трифазного навантаження відбувається в момент часу $0,06$ с, а скид – в момент часу $0,12$ с.

На вхід блока зворотного перетворення струмів (рис. 1) поступає сигнал

$$i_{dosc}(t) = \Delta i_d(t) - i_d(t), \quad (1)$$

де $\Delta i_d(t)$ – значення приросту струму $i_d(t)$, що зумовлений відхилення напруги $U_{dc}(t)$ від заданого значення U_{dcref} ; $i_d(t)$ – складник пульсацій струму $i_d(t)$.

Визначення складника пульсацій струму здійснюється за допомогою виразу:

$$i_d(t) = i_d(t) - I_d(t), \quad (2)$$

де $I_d = \frac{6}{T} \int_{t-T/6}^t i_d(t) dt$ – усереднене значення струму $i_d(t)$.

Для реалізації регулятора напруги, було розглянуто два варіанти схеми керування на базі FIR та IIR фільтрів. Розроблену блок-схему першого варіанта регулятора напруги зображено на рис. 2. В першому варіанті використано елемент затримки, фільтр нижніх частот FIR та блок «sgn». Фільтр нижніх частот FIR (фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою) має транспоновану структуру та затримку, яка регулюється під час зростання та спадання сигналу за допомогою дискретного інтегратора часу. Додатковий блок «sgn» використовується для

обмеження вихідного сигналу до одиничної амплітуди та покращення компенсації вищих гармонік.

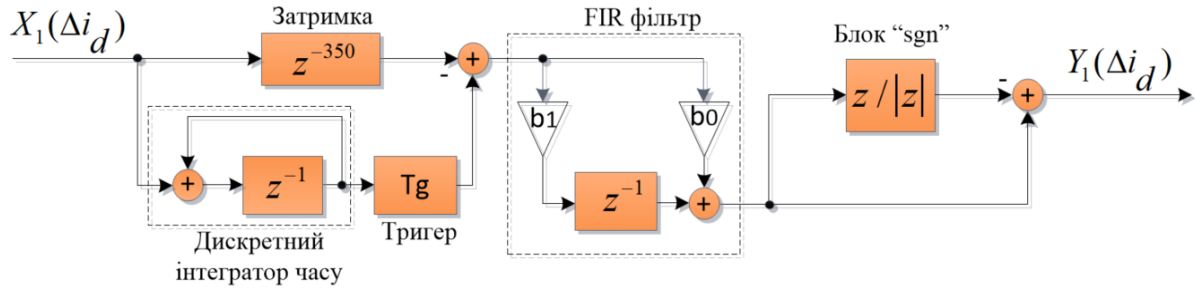


Рис. 2. Блок-схема першого варіанта регулятора напруги

В першому варіанті ефективність роботи регулятора напруги на конденсаторах залежить від налаштувань FIR фільтра. В результаті підбору коефіцієнтів $b_0 = -0,3$ та $b_1 = 1$ z – перетворення передаточної функції якого можна подати у вигляді

$$\frac{Y_{FIR}(z)}{X_{FIR}(z)} = \frac{-0,3 + z^{-1}}{1} = \frac{-0,3 \cdot (z - 3,333)}{z} \quad (3)$$

Швидкодія FIR фільтра є вищою, ніж IIR фільтра, тому він може краще розділяти частоти. Однією з найважливіших особливостей конструкції FIR фільтра є його автономна робота [7].

Передаточну функцію регулятора напруги для першого варіанта можна представити у вигляді

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{(z - |z|) \cdot (0,3 \cdot z - 1) \cdot (z^{350} - z + 1)}{z^{351} \cdot |z| \cdot (z - 1)} \quad (4)$$

Затримка варіюється в залежності від коефіцієнта передачі фільтра в межах 350 – 260 тактів (що відповідає показнику степені 351 – 261), яка регулюється дискретним інтегратором часу та виконує функцію компенсатора перерегулювань сигналу шляхом зміни кількості тактів затримки. Тригер, що використовується для скидання станів до початкових умов, налаштований на зростаючий або спадний фронт [8].

Інтегратор, який регулює затримку, має нульову передачу на постійному струмі. Його передаточна функція має такий вигляд:

$$\frac{Y_{DI}(z)}{X_{DI}(z)} = \frac{1}{z - 1} = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (5)$$

Отже, сигнал на виході інтегратора визначається як сума поточного вихідного сигналу з незначною затримкою та вхідного сигналу на попередньому кроці.

Функцію «sgn» можна представити у такому вигляді:

$$\operatorname{sgn} z = \begin{cases} z / |z|, & z \neq 0; \\ 0, & z = 0. \end{cases} \quad (6)$$

При цьому

$$z / |z| = \cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi}, \quad (7)$$

де $\varphi = \arg z$ – аргумент комплексного числа z .

Точка $z = 0$ є точкою розриву першого роду, оскільки межі зліва і справа від нуля дорівнюють, відповідно, +1 та -1. Вираз (7) є одним з можливих узагальнень функції сігну на площині комплексних чисел.

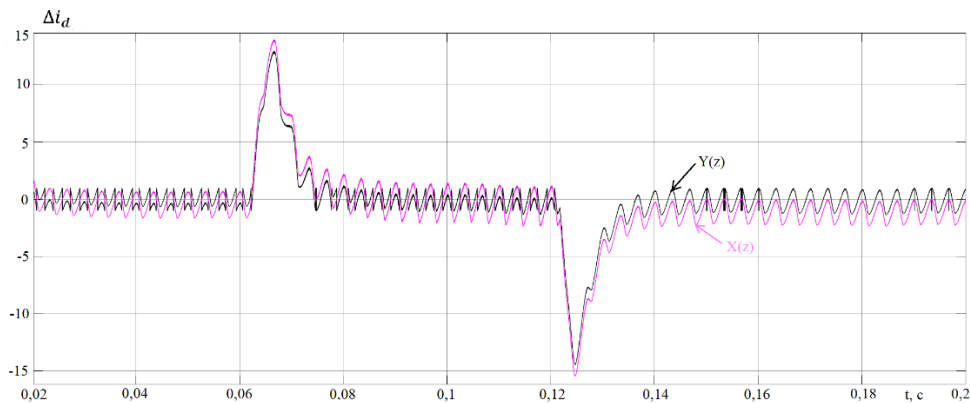
При $z \neq 0$ результатом функції $\operatorname{sgn} z$ є точка одиничного кола. Сенс цього узагальнення полягає в тому, щоб за допомогою радіус-вектора одиничної довжини показати напрямок на комплексній площині, що відповідає числу z . Цей напрямок у полярних координатах задає кут φ . Невизначений напрямок, що відповідає числу $z = 0$, виражається нульовим значенням функції.

На рис. 3 можна побачити результат використання функції «sgn» відносно вхідного сигналу.

У другому варіанті використано фільтр нижніх частот IIR (фільтр із нескінченною імпульсною характеристикою), який скидається по рівню затримки через блок дискретного інтегратора часу. В другому варіанті відмінність регулятора напруги від першого варіанта полягає в IIR фільтрі, який швидше реалізується і запускається, наприклад, у вбудованій системі реального часу.

Для даного IIR фільтра першого порядку була розроблена максимально ефективна структура, яка підтримує одиничну амплітудну характеристику, але з неможливістю підтримувати постійний коефіцієнт підсилення. Тому, для вирішення цієї проблеми було вирішено скидати фільтр по рівню затримки через дискретний часовий інтегратор, який ефективно підтримує коефіцієнт підсилення. В результаті підбору коефіцієнтів $b_1 = 0,75$, $a_0 = 0,75$ та $a_1 = 1$ для z – перетворення, IIR фільтр буде підтримувати одиничну амплітудну характеристику.

$$\frac{Y_{IRR}(z)}{X_{IRR}(z)} = \frac{0,75 + z^{-1}}{1 + 0,75 \cdot z^{-1}} = \frac{(z + 1,333)0,75}{z + 0,75}. \quad (8)$$

Рис. 3. Графік реакції сигналу Δi_d на роботу блоку «sgn»

Ще один момент, на який слід звернути увагу, що для ІІР фільтрів вищого порядку характерна нестійка робота системи, тоді як FIR фільтри завжди стабільні. ІІР фільтри мультифункціональні та мають параметри, які можна змінювати, щоб швидко змінити характеристики фільтра.

Імпульсна характеристика ІІР фільтра є загасаючою експонентою. Рівняння ІІР фільтра першого порядку можна записати у вигляді z-перетворення

$$\bar{y}_{IRR}[z] = (1 - \gamma) \cdot \bar{x}_{IRR}[z] + \gamma \cdot z^{-1} \cdot \bar{y}_{IRR}[z]. \quad (9)$$

де $0 \leq \gamma < 1$.

Перегрупуємо, щоб отримати передаточну функцію

$$G(z) = \frac{\bar{y}_{IRR}(z)}{\bar{x}_{IRR}(z)} = \frac{1 - \gamma}{1 - \gamma \cdot z^{-1}}. \quad (10)$$

ІІР фільтр має структуру прямої форми II та потребує лише N одиниць затримки, де N є порядком фільтра – потенційно вдвічі меншим, ніж для прямої форми I. Цю структуру отримують шляхом зміни порядку чисельника та знаменника прямої форми I, оскільки вони насправді є двома лінійними системами, і застосовується властивість комутативності. Блок-схему другого варіанта регулятора напруги показано на рис. 4.

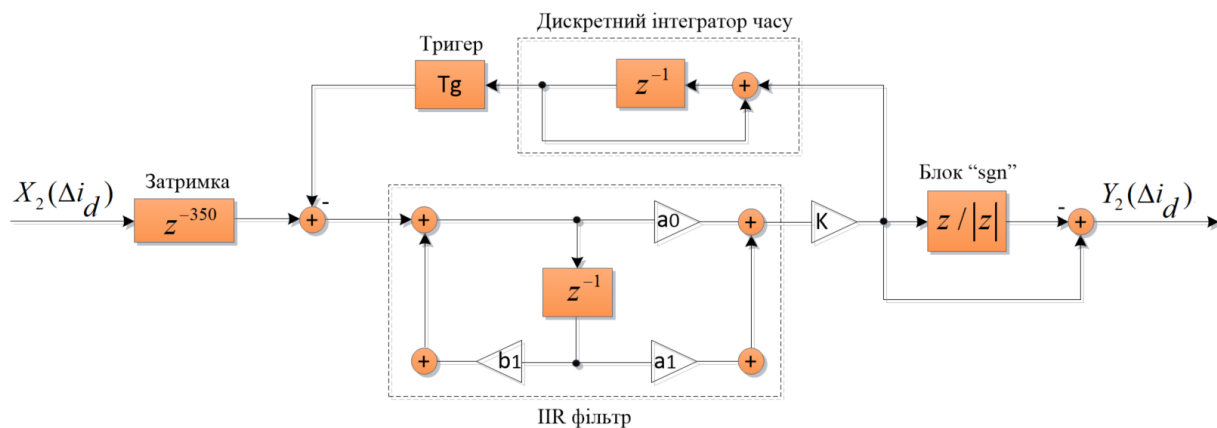


Рис. 4. Блок-схема другого варіанта регулятора напруги

Передаточну функцію замкненого контуру регулятора напруги з ІІР фільтром в z – перетворенні можна представити у вигляді

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = - \frac{56 \cdot |z| - 56 \cdot z + 21 \cdot z^2 \cdot |z| + 14 \cdot z^2 - 21 \cdot z^3 - 14 \cdot z \cdot |z|}{z^{350} \cdot |z| \cdot (10 \cdot z - 40 \cdot z^2 + 30)}. \quad (11)$$

Після дослідження першого та другого варіантів схеми керування регулятора напруги на конденсаторах експериментально встановлено можливість регулювання коефіцієнта підсилення ІІР фільтра та постійний коефіцієнт передачі FIR фільтра в межах 0,75 – 0,85 [9]. Це дозволяє ефективно компенсувати вищі гармоніки та забезпечувати мінімальне перерегулювання навантаження під час перехідного процесу (рис. 5).

Активний фільтр працює в режимі компенсації реактивної потужності та вищих гармонік. При переведенні його в режим лише компенсації вищих гармонік відбувається значне зростання компенсаційної

здатності в порівнянні з попереднім режимом.

Для побудови графіків залежності зміни основних параметрів системи від часу моделювання потрібно: визначити активну і реактивну потужність, струм мережі та середньоквадратичне відхилення активної та реактивної потужності, яке можна знайти через їх ефективне значення на періоді.

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) dt}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T q^2(t) dt}. \quad (12)$$

Щоб оцінити загальний рівень пульсацій потрібно знайти середньоквадратичні відхилення за допомогою виразу.

$$\sigma_p = \sqrt{P_e^2 - P^2}; \quad \sigma_q = \sqrt{Q_e^2 - Q^2}. \quad (13)$$

Ефективний період перехідного процесу є мінімальним для забезпечення максимальної швидкодії під час коливаний напруги. Графіки для кожного з варіантів ідентичні з похибкою менше 1%.

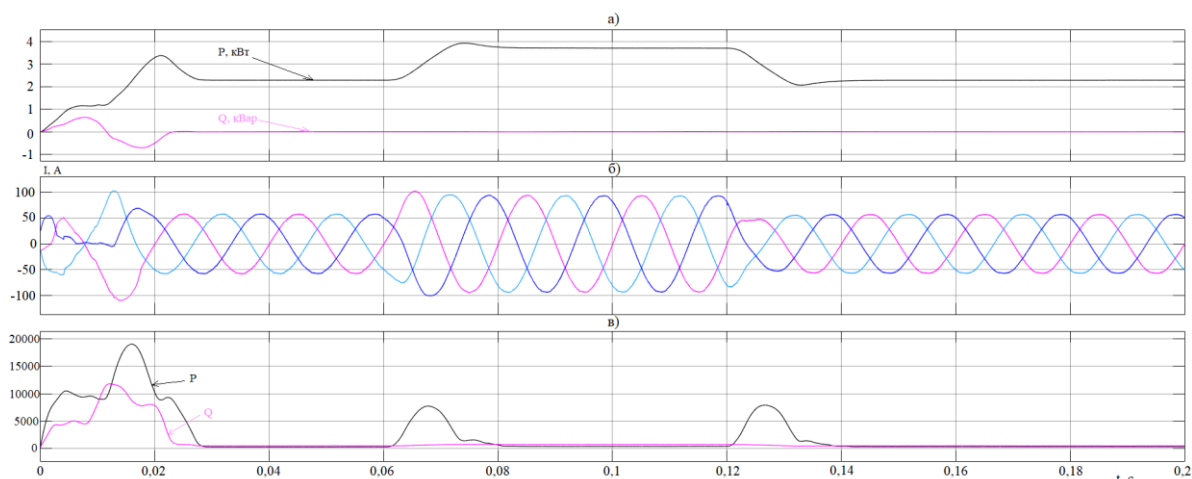


Рис. 5. Графіки зміни параметрів електричної мережі: а) дійсна активна та реактивна потужності після компенсації; б) струм мережі після компенсації вищих гармонік; в) середньоквадратичні відхилення активної та реактивної потужності під час зміни навантаження

Графік зміни напруги на конденсаторі на рисунку 6 однаковий для двох варіантів. З рисунку 6 можна зробити висновок про високу швидкість регулятора напруги при мінімальних коливаннях напруги на конденсаторі. Глибина провалу напруги на конденсаторі визначається ємністю конденсатора та може бути зменшена збільшенням ємності конденсатора, але за рахунок зменшення швидкодії та зростання похибки.

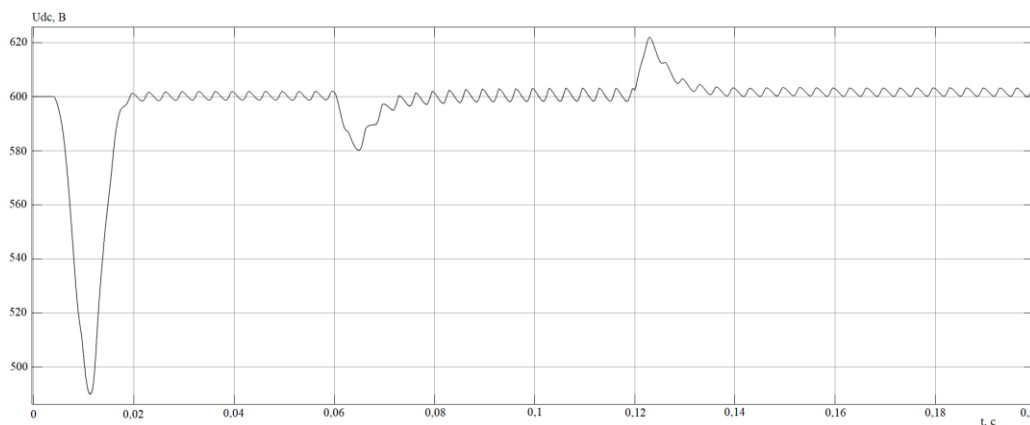


Рис. 6. Графік зміни напруги на конденсаторах

Таблиця 1

Результати моделювання САФ в режимі компенсації реактивної потужності та вищих гармонік

Значення фізичних величин для симетричного режиму	I_A	I_B	I_C
Амплітудні значення струмів мережі навантаження (A)	103,8	103,8	103,8
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів навантаження (%)	8,52	8,52	8,52
Амплітудні значення струмів мережі після компенсації (A) IIR	93,75	93,89	93,82
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі (%) IIR	0,72	0,71	0,73
Амплітудні значення струмів мережі після компенсації (A) FIR	93,78	93,89	93,79
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі (%) FIR	0,72	0,72	0,72

Під час моделювання були використані IGBT транзистори, які набагато легші в керуванні та гірші в якісних характеристиках. В малопотужних САФ можна використати MOSFET транзистори, що пропонують кращі якісні показники.

Результати моделювання при використанні обох фільтрів для компенсації реактивної потужності та вищих гармонік наведено в таблиці. Значення сумарного коефіцієнта компенсації гармонічних спотворень струму керується за допомогою коефіцієнта передачі кожного з фільтрів.

Результати моделювання при використанні обох фільтрів практично однакові (див. таблицю).

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблений регулятор напруги, що містить FIR або IIR фільтри можна використовувати для оптимізації часу заряду/розряду конденсаторів за допомогою блоку затримки, яка регулюється інтегратором часу в залежності від випадку та блоком «sgn», що стабілізує вихідний сигнал та зменшує амплітуди 5 та 7 гармонік, відповідно, в 4 та 6 разів. Для покращення компенсаційної здатності активного фільтра виконано налаштування блока ковзного усереднення струму на шосту гармоніку у разі симетричного навантаження, що забезпечує зменшення амплітуди 5 та 7 гармонік в два рази. В залежності від потреб виробництва є можливість вибору ефективнішого варіанта: 1) високо селективні IIR фільтри, які можуть бути реалізовані за допомогою конструкцій низького порядку та можуть працювати на високих швидкостях; 2) FIR фільтри, які зазвичай мають низький коефіцієнт та рівень помилок арифметичного округлення і добре визначений шум квантування для застосування в низьковольтних трифазних електричних мережах.

Література

1. H. Akagi, "Active harmonic filters", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, № 12, pp. 2128-2141, 2005.
2. H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous power theory and applications to power conditioning, *Wiley-IEEE Press*, pp. 400, 2007.
3. Т. В. Мисак, В. М. Михальський, "Формування компенсаційного струму трифазного паралельного активного фільтра за допомогою різномісцевих ковзних режимів", *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 29-34. ISSN 1607-7970.
4. К. І. Денисенко, І. С. Кутрань, В. О. Лесик, Т. В. Мисак, "Збільшення швидкодії контуру слідкування за напругою накопичувального конденсатора трифазного паралельного активного фільтра", *Праці ІЕД НАН України*. 2020. Вип. 55. ISSN 1727-9895.
5. М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, та Д. Ю. Лебедь, «Підвищення точності регулювання напруги на конденсаторі активного фільтра», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 1, с. 28–34, Берез. 2022.
6. М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, та Д. Ю. Лебедь, "Система прямого керування струмом активного фільтра", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 2, с. 69–75, 2021.
7. K. Ichige, M. Iwaki, and R. Ishii, "Accurate estimation of minimum filter length for optimum FIR digital filters", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, pp. 1008-1016, vol. 47, 10 Oct. 2000, doi: 10.1109/82.877143
8. M. S. Anderson; S. Summerfield, "Power-time tradeoffs in digital filter design and implementation", *IEE Colloquium on Low Power Analogue and Digital VLSI: ASICS, Techniques and Applications*, 2-2 June 1995, doi: 10.1049/ic:19950795
9. Fred Taylor, Digital Filters: Principles and Applications with MATLAB, *Wiley-IEEE Press*, pp. 320, 2012.

References

1. H. Akagi, "Active harmonic filters", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, № 12, pp. 2128-2141, 2005.
2. H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous power theory and applications to power conditioning, *Wiley-IEEE Press*, pp. 400, 2007.
3. Т. В. Мисак, В. М. Михальський, "Formuvannya kompensatsiynoho strumu tryfaznogo paralelnoho aktyvnoho filtra za dopomohoiu riznotempovykh kovznykh rezhymiv", *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. № 4. С. 29-34. ISSN 1607-7970.
4. К. І. Денисенко, І. С. Кутрань, В. О. Лесик, Т. В. Мисак, "Zbilshennia shvydkodii konturu slidkuvannia za napruhoiu nakopychuvального конденсатора tryfaznogo paralelnoho aktyvnoho filtra", *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2020. Vyp. 55. ISSN 1727-9895.
5. М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, та Д. Ю. Лебедь, «Pidvyshchennia tochnosti rehulivannia napruhy na kondensatori aktyvnoho filtra», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, vyp. 1, s. 28–34, Berez. 2022.
6. М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, та Д. Ю. Лебедь, "Systema priamoho keruvannia strumom aktyvnoho filtra", *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, vyp. 2, s. 69–75, 2021.
7. K. Ichige, M. Iwaki, and R. Ishii, "Accurate estimation of minimum filter length for optimum FIR digital filters", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, pp. 1008-1016, vol. 47, 10 Oct. 2000, doi: 10.1109/82.877143
8. M. S. Anderson; S. Summerfield, "Power-time tradeoffs in digital filter design and implementation", *IEE Colloquium on Low Power Analogue and Digital VLSI: ASICS, Techniques and Applications*, 2-2 June 1995, doi: 10.1049/ic:19950795
9. Fred Taylor, Digital Filters: Principles and Applications with MATLAB, *Wiley-IEEE Press*, pp. 320, 2012.

ОСАДЧУК Я.О.

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>
e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

ОСАДЧУК О. В.

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>
e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

САДЧУК В. С.

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-3142-3642>
e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

АВТОГЕНЕРАТОРНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ТИСКУ

Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними тензочутливими резистором і діодом, при чому первинні тензочутливі елементи є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію сенсорів тиску. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активний індуктивний елемент на основі транзистора з фазозсувачим RC-колом, що дає можливість розширити діапазон регулювання вихідної частоти, а також повністю виготовляти сенсори тиску за мікроелектронною технологією. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних тензочутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі сенсорів тиску на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у зміні функції перетворення вносить зміна тиску. Це викликає зміну еквівалентної ємності та від'ємного диференціального опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що у свою чергу, змінює вихідну частоту пристроїв. Чутливість сенсорів тиску змінюється від 0,365 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа. Отримані параметричні залежності функцій перетворення сенсорів тиску показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики сенсорів і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенератора на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення на основі рівнянь Кірхгофа. У сенсорах тиску з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі та підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Ключові слова: сенсор, тиск, від'ємний диференціальний опір, автогенератор, тензорезистор, тензодіод.

Jaroslav OSADCHUK, Alexander OSADCHUK, Vladimir OSADCHUK
Vinnytsia National Technical University

SELF-OSCILLATING PARAMETRIC PRESSURE SENSORS

Self-oscillating parametric pressure sensors are proposed based on transistor microelectronic structures with negative differential resistance with primary strain-sensing resistor and diode, and the primary strain-sensing elements are active elements of the self-oscillator circuit, which simplifies the design of pressure sensors. It is also proposed to replace the passive inductance of the self-oscillator oscillatory circuit with an active inductive element based on a transistor with a phase-shifting RC circuit, which makes it possible to expand the range of output frequency adjustment, as well as to fully produce pressure sensors using microelectronic technology. Based on the consideration of physical processes in primary strain-sensing elements and self-oscillators, mathematical models of pressure sensors have been developed, on the basis of which parametric dependences of the conversion and sensitivity functions have been obtained. It is shown that the main contribution to the change in the conversion function is made by the change in pressure. This causes a change in the equivalent capacitance and negative differential resistance of the oscillatory system of sensor self-oscillators, which in turn changes the output frequency of the devices. The sensitivity of the pressure sensors varies from 0.365 kHz/kPa to 2.45 kHz/kPa when the pressure changes from 0 kPa to 2050 kPa. The obtained parametric dependences of the conversion functions of pressure sensors show the possibility of easier calculation of the main characteristics of the sensors and clearly show the influence of each parameter of the primary converters and the parameters of the self-oscillator on the output frequency of the sensors in comparison with the calculations of the conversion functions based on the Kirchhoff equations. Pressure sensors with a frequency output do not require analog-to-digital converters and amplifying devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment, in addition, it is possible to transmit information over a distance when the sensors operate at microwave frequencies.

Keywords: sensor, pressure, negative differential resistance, self-oscillator, strain-sensing resistor, strain-sensing diode.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Вимірювання тиску потрібно в багатьох галузях виробництва і техніки, зокрема у автомобільній промисловості, побутовій техніці, медицині, будівельній техніці, газовій та нафтовій промисловості, космічних дослідженнях, військовій техніці, дослідженнях навколишнього середовища, атомній енергетиці, що вимагає створення вимірювальних приладів високої точності та чутливості, високої швидкодії, здатності витримувати переважання, лінійну безінерційну характеристику [1, 2, 3, 4–8].

Для вимірювання тиску використовуються сенсори ємнісного, п'єзорезистивного, магнітопружного, індуктивного, п'єзоелектричного та акустоелектричного типів. Сенсори ємнісного типу мають високу

точність і чутливість, термостабільність, проте їх недоліками є непридатність роботи при високих тисках, а також мають високу вартість. Сенсори індуктивного типу характеризуються температурною нестабільністю, високою чутливістю до ударів та вібрацій. П'єзоелектричні сенсори мають низькі вихідні сигнали, низьку точність і чутливість, недостатню стабільність. П'єзореzystивні сенсори тиску мають низькі вихідні сигнали, чутливі до зміни температури, проте мають високу міцність, малий гістерезис, широкий температурний діапазон [9–11].

Як видно з аналізу літератури [1, 2, 3–11], одним з основних недоліків існуючих сенсорів тиску є низький вихідний сигнал, окрім індуктивних сенсорів тиску, виготовлення яких несумісне з інтегральною мікроелектронною технологією. Це приводить до значних похибок вимірювання внаслідок втрат інформації в каналі між виходом сенсора і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, що обумовлює їх низьку точність і чутливість, низьку завадостійкість і швидкодію. Усунути вище перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних параметричних сенсорів, що працюють в режимі перетворення «тиск-частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [12, 13].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з перспективних наукових напрямків у створення сенсорів тиску є дослідження в області сенсорів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Автогенераторні параметричні сенсори тиску поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують прилади з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення «тиск-частота» на основі автогенераторних параметричних сенсорів тиску суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники сенсорів тиску, підвищити точність і чутливість перетворення тиску у частоту [14–19].

Постановка завдання

Метою роботи є створення та дослідження сенсорів тиску на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких тензорезистор і тензодіод виступають як первинні перетворювачі тиску, так і як активні елементи автогенераторів, в яких втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією від'ємного диференціального опору, що дозволяє перетворити тиск у частоту. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для побудови сенсорів тиску з частотним виходом;
- 2) розробити математичні моделі сенсорів тиску, в яких враховано залежність параметрів тензочутливих елементів від дії тиску та їх вплив на вихідну частоту сенсора;
- 3) отримати параметричні залежності вихідної частоти та чутливості сенсора від дії тиску;
- 4) зробити висновки з проведення досліджень.

Математичні моделі сенсорів тиску

Сенсор тиску з частотним вихідним сигналом базується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій тензочутливим елементом є тензорезистор. На рис. 1 подано електричну схему мікроелектронного сенсора тиску.

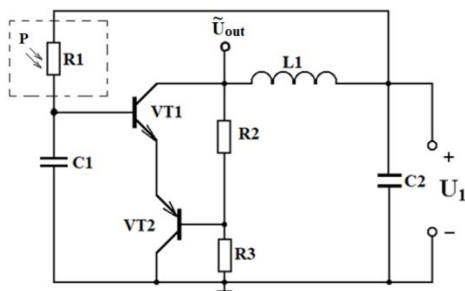


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного сенсора тиску

Вона уявляє собою інтегральну мікроелектронну схему, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності, що приводить до появи від'ємного диференціального опору на електродах колектор-колектор транзисторів. Тензочутливий резистор R1 типу Interlink Electronics FSR-400 включено у коло зворотного позитивного зв'язку. На електродах колектор-колектор VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 і до верхнього виводу ємності C1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються енергією від'ємного диференціального опору. Ємність C1 запобігає проходженню змінного високочастотного струму через джерело постійної напруги U1, що живить схему пристрою. Резонансна частота коливального контуру залежить від дії тиску на тензочутливий резистор R1, оскільки змінюється його струм, що приводить до зміни еквівалентної ємності і від'ємного диференціального опору у коливальній системі автогенератора сенсора [20].

Перейдемо до розгляду залежності параметрів тензорезистора від дії тиску на нього. Фізична причина деформаційних ефектів полягає у зміщенні енергетичних рівнів при дії деформації і пов'язана з цим зміна енергетичного спектра електронів і дірок в залежності від деформації, а це приводить до зміни електричних характеристик напівпровідника. В однорідних напівпровідниках зміщення енергетичних рівнів

приводить до залежності опору від деформації, тобто виникає тензорезистивний ефект [21, 22]. Зміна опору напівпровідника при його деформації описується коефіцієнтом тензочутливості [21]

$$m = \frac{\Delta R}{R} \bigg/ \frac{\Delta l}{l} . \quad (1)$$

де $\Delta R / R$ – відносна зміна опору, $\Delta l / l$ – відносна зміна довжини у напрямку дії деформації, l – розмір напівпровідника у напрямку деформації. Тензорезистори виготовляються з домішкових напівпровідників, в яких концентрації основних носіїв дорівнює концентрації домішок, що приводить до зменшення впливу температури на опір тензорезистора. У цьому випадку концентрація носіїв не залежить від деформації, тому зміна опору при дії тиску визначається тільки змінною рухливості електронів і дірок у напівпровіднику тензорезистора. Коефіцієнт тензочутливості для германію і кремнію лежить в діапазоні від 140 до 175. Його величина суттєво залежить від провідності напівпровідника і напрямку деформації. Велику тензочутливість мають також напівпровідникові сполуки GaSb, InSb, PbTe [21, 22].

Виходячи з загального виразу фізичного закону Ома, можна визначити величину тензоструму, який протікає через напівпровідник тензорезистора

$$I_p = qn_0\mu_{ef}(P)ES , \quad (2)$$

де q – заряд електрона, n_0 – концентрація електронів, $\mu_{ef}(P)$ – ефективна рухливість електронів, яка залежить від дії тиску, E – напруженість електричного поля у напівпровіднику тензорезистора, S – площа перерізу тензорезистора. Отже, опір тензорезистора, який залежить від тиску, визначається виразом

$$R(P) = \frac{U_p}{qn_0\mu_{ef}(P)ES} , \quad (3)$$

де U_p – напруга на тензорезисторі. Згідно формули (3), зміна опору $R(P)$ при дії тиску описується формулою

$$\Delta R(P) = \frac{\partial R}{\partial \mu_{ef}(P)} \Delta \mu_{ef}(P) . \quad (4)$$

Провівши диференціювання у виразі (4), отримуємо рівняння

$$\Delta R(P) = - \frac{U_p}{qn_0\mu_{ef}^2(P)ES} \Delta \mu_{ef}(P) . \quad (5)$$

Формула (5) дозволяє аналітично визначити зміну опору тензорезистора від дії тиску.

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора тиску від параметрів тензорезистора і параметрів автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії тиску в енергію змінного електричного поля на виході сенсора. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії сенсора. На першому етапі енергія тиску перетворюється в енергію електричного поля через зміну напруги на тензорезисторі, яка є вхідною напругою для автогенератора пристрою. В подальшому енергія електричного поля, яка визначається напругою на тензорезисторі перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора сенсора.

Коефіцієнт корисної дії сенсора тиску дорівнює

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} , \quad (6)$$

де $P_{вх}$, $P_{вих}$ – вхідна і вихідна потужність у сенсорі тиску.

Вихідна потужність описується виразом

$$P_{вих} = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2t} , \quad (7)$$

де $C_{екв}$ – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, U_{\sim} – вихідна змінна напруга, t – період коливань змінної вихідної напруги без дії тиску. Вхідна потужність описується формулою

$$P_{вх} = qn_0 U_p \mu_{ef}(P) ES . \quad (8)$$

Таким чином, коефіцієнт корисної дії пристрою приймає вид

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2tqn_0 U_p \mu_{ef}(P) ES} . \quad (9)$$

З формули (9) визначається $C_{екв}$, яка описується виразом

$$C_{екв} = \frac{2\eta tqn_0 U_p \mu_{ef}(P) ES}{U_{\sim}^2} . \quad (10)$$

З другого боку, еквівалентну ємність $C_{екв}$ можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \left[\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

де R_g – від’ємний диференційний опір коливального контуру, L – індуктивність контуру. З виразу (11) отримаємо квадратне рівняння, з якого визначаємо $C_{екв}$

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0. \quad (12)$$

Введемо позначення

$$a_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (13)$$

$$a_2 = R_g^2, \quad (14)$$

$$a_3 = L, \quad (15)$$

$$a_4 = C_{екв} = \frac{2\eta t q n_0 U_p \mu_{эф}(P) E S}{U_{\sim}^2}. \quad (16)$$

Тоді $C_{екв}$ з рівняння (12) дорівнює

$$C_{екв} = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1}. \quad (17)$$

Прирівнявши вираз (17) до виразу (10), отримаємо рівняння для визначення F_0 , яке має вигляд

$$a_1 = \frac{a_2}{a_4} - \frac{a_3}{a_4^2}. \quad (18)$$

Підставивши значення виразів (13)-(16) у формулу (18), отримуємо рівняння

$$(4\pi^2 R_g^2 L) F_0^2 = \frac{R_g^2 U_{\sim}^2}{2\eta t q n_0 U_p \mu_{эф}(P) E S} - \frac{L U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 q^2 n_0^2 U_p^2 \mu_{эф}^2(P) E^2 S^2}. \quad (19)$$

З рівняння (19) визначаємо параметричну залежність резонансної частоти сенсора від параметрів первинного перетворювача тиску і параметрів автогенератора, отже

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta t q n_0 U_p \mu_{эф}(P) E S L} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 q^2 n_0^2 U_p^2 \mu_{эф}^2(P) E^2 S^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (20)$$

Отримана формула (20) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення сенсора, ніж складним шляхом з еквівалентної схеми сенсора на основі рівнянь Кірхгофа, які можна вирішити на комп’ютері чисельним шляхом.

На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення сенсора тиску.

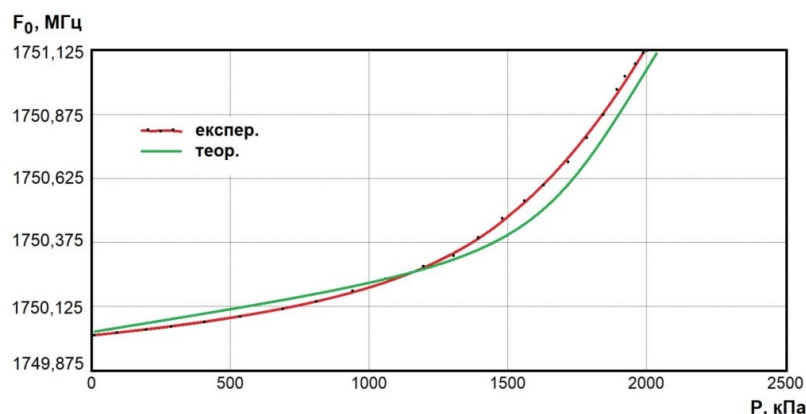


Рис. 2. Залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення від тиску

Чутливість сенсора визначається похідною функції (20) за параметром тиску P . Як показують експериментальні дослідження, вихідна змінна напруга U_{\sim} залежить від тиску, що необхідно врахувати при визначенні функції чутливості. З врахуванням цього зауваження функція (20) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_{\sim}^2(P) \mu_{эф}^{-1}(P) a_5 - U_{\sim}^4(P) \mu_{эф}^{-2}(P) a_6 \right]^{1/2}. \quad (21)$$

де

$$a_5 = \frac{1}{2\eta t q n_0 U_p ESL}, \quad (22)$$

$$a_6 = \frac{1}{4\eta^2 t^2 q^2 n_0^2 E^2 S^2 R_g^2}. \quad (23)$$

Чутливість описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(P) \mu_{ef}^{-1}(P) a_5 - U_{\sim}^4(P) \mu_{ef}^{-2}(P) a_6 \right]^{-1/2} \times \left[\left(2U_{\sim}(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} \mu_{ef}^{-1}(P) a_5 - \right. \right. \\ \left. \left. - U_{\sim}^2(P) \mu_{ef}^{-2}(P) a_5 \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} \right) - \left(4U_{\sim}^3(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} \mu_{ef}^{-2}(P) a_6 - 2\mu_{ef}^{-3}(P) \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} U_{\sim}^4(P) a_6 \right) \right]. \quad (24)$$

Графік чутливості сенсора від тиску подано на рис. 3.

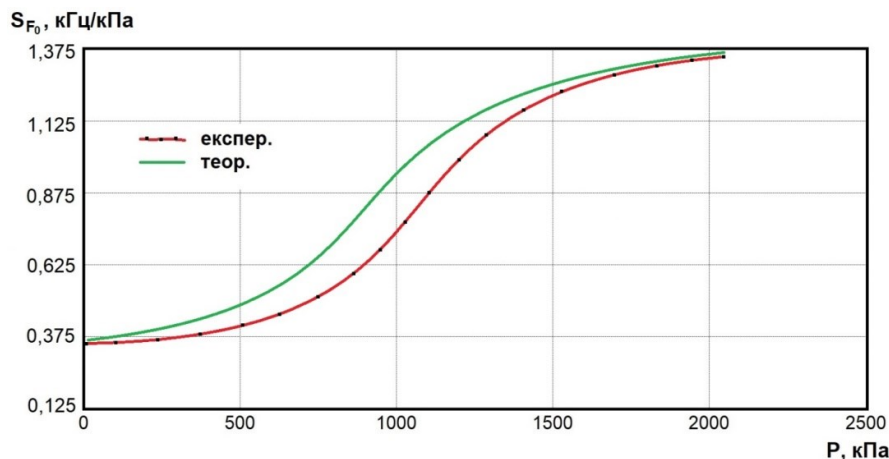


Рис. 3. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості від тиску

Як видно з графіка (рис. 3), чутливість в діапазоні від 0 кПа до 2050 кПа складала від 0,365 кГц/кПа до 1,370 кГц/кПа.

Подальше покращення метрологічних параметрів сенсорів тиску можливо отримати на основі автогенераторних параметричних пристроїв з використанням у якості первинного перетворювача тиску тензорезистивного діода. Електрична схема сенсора тиску подано на рис. 4.

Вона аналогічна схемі сенсора тиску, що подано на рис. 1, окрім того, що замість ємності C1 включено тензочутливий діод типу SS316L, а також замість пасивної індуктивності L1 включено активний індуктивний елемент на основі біполярного транзистора VT3 з фазозсуваючим колом R4C1. Виникнення індуктивних властивостей у біполярних транзисторах обумовлено кінцевою швидкістю руху носіїв заряду у базовій області. Сигнал, що прикладений до емітера, не може з'явитися на колекторному переході, доки носії заряду проходять базу, в результаті чого виникає затримка у часі. Отже, струм колектора відстає у часі від напруги на емітері, яка викликала цей струм, що відповідає індуктивній реакції на електродах емітер-колектор біполярного транзистора. Величина індуктивності та її добротності визначається на основі нелінійної моделі біполярного транзистора. Включення зовнішнього R4C1 кола до транзистора VT3 дозволяє збільшити як індуктивність, так і добротність активного елемента з однієї сторони, а з іншої сторони – повністю реалізувати увесь пристрій за мікроелектронною технологією [19]. Резонансна частота пристрою залежить від тиску за рахунок зміни еквівалентної ємності та від'ємного диференційного опору у коливальній системі автогенератора сенсора.

Тензочутливий діод включено у зворотному режимі, тобто його зворотний струм залежить повністю від дії тиску. З врахуванням співвідношення Ейнштейна, яке дорівнює $D_p/\mu_p = D_n/\mu_n = kT/q$, зворотний струм p⁺-n переходу при дії тиску описується виразом [21]

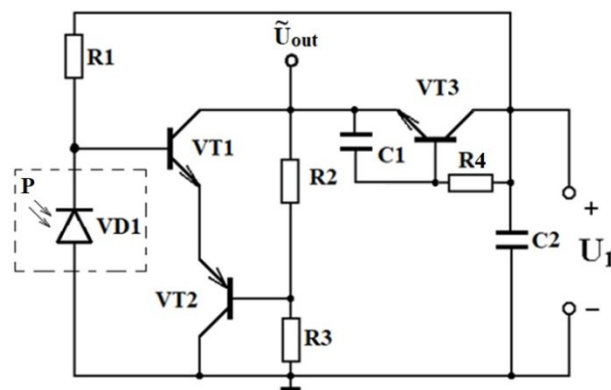


Рис. 4. Електрична схема мікроелектронного сенсора тиску з активним індуктивним елементом

$$I(P) = S \left[\frac{qkT\mu_{pef}(P)}{\tau_p} \right]^{1/2} \cdot p_{n0} \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}(P)}{kT} \right), \quad (25)$$

де τ_p – час життя неосновних носіїв, які в домішкових напівпровідниках не залежить від дії тиску, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, p_{n0} – концентрація неосновних носіїв (дірок) без дії тиску, $E_{gef}(P)$ – ширина забороненої зони напівпровідника тензодіода, яка змінюється з тиском, S – площа перерізу напівпровідника тензодіода. Таким чином, при дії тиску на тензодіод змінюється рухливість носіїв заряду і ширина забороненої зони напівпровідника. Максимальну тензочутливість можна отримати при узгодженій зміні рухливості $\mu_{pef}(P)$ і зміні ширини $\Delta E_{gef}(P)$ забороненої зони відносного струму, тобто якщо $\Delta E_{gef}(P)$ збільшується, то $\mu_{pef}(P)$ повинно зменшуватися і навпаки [21]. Тензодіоди мають більшу чутливість у порівнянні з тензорезисторами, оскільки у них змінюються два параметри від тиску, а в тензорезисторах тільки один.

Згідно формули (25), опір тензодіода при дії тиску описується формулою

$$R(P) = \frac{U_g \tau_p^{1/2}}{\left[qkT\mu_{ef} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) S}, \quad (26)$$

де U_g – напруга на тензодіоді. Приріст опору тензодіода при дії тиску має вигляд

$$\Delta R(P) = \frac{\partial R}{\partial \mu_{ef}} \Delta \mu_{ef}(P) + \frac{\partial R}{\partial E_{gef}} \Delta E_{gef}(P). \quad (27)$$

Виконавши диференціювання у формулі (27), отримаємо

$$\Delta R(P) = -\frac{U_g \tau_p^{1/2} \mu_{ef}^{-3/2}}{2[qkT]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) S} \Delta \mu_{ef}(P) + \frac{U_g \tau_p^{1/2} \exp \left(\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right)}{[q\mu_{ef}]^{1/2} p_n S (kT)^{3/2}} \Delta E_{gef}(P), \quad (28)$$

Визначивши залежності зміни опору тензочутливого діода від тиску, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора при дії тиску. Ця залежність визначається аналогічним чином як і для сенсора з тензорезистором, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора сенсора визначається на основі виразів (25) і (26)

$$P_{ex} = \left[\frac{qkT\mu_{ef}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) U_g S. \quad (29)$$

Вихідна потужність визначається формулою (7). Отже, виходячи з формул (7) і (29), коефіцієнт корисної дії сенсора дорівнює

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2t \left[\frac{qkT\mu_{ef}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) U_g S}. \quad (30)$$

З рівняння (30) визначається $C_{екв}$, яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{2\eta t \left[\frac{qkT\mu_{ef}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) U_g S}{U_{\sim}^2}. \quad (31)$$

З другого боку, еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора зв'язана з резонансною частотою виразом (11).

Підставивши у формулу (11) вираз (31) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти від тиску, а також від параметрів тензодіода і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta t \left[\frac{qkT\mu_{ef}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) L U_g S} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 \left[\frac{qkT\mu_{ef}}{\tau_p} \right] p_n^2 \exp \left(-\frac{\Delta E_{gef}}{kT} \right) R_g^2 U_g^2 S^2} \right]^{1/2}. \quad (32)$$

Вираз (32) є функцією перетворення сенсора тиску. На рис. 5 надано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії тиску на сенсор. Відносна похибка між розрахунками і експериментом складає 5 % при вимірюванні тиску величиною від 0 до 2100 кПа.

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота змінюється від 1750 МГц до 1752 МГц при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа.

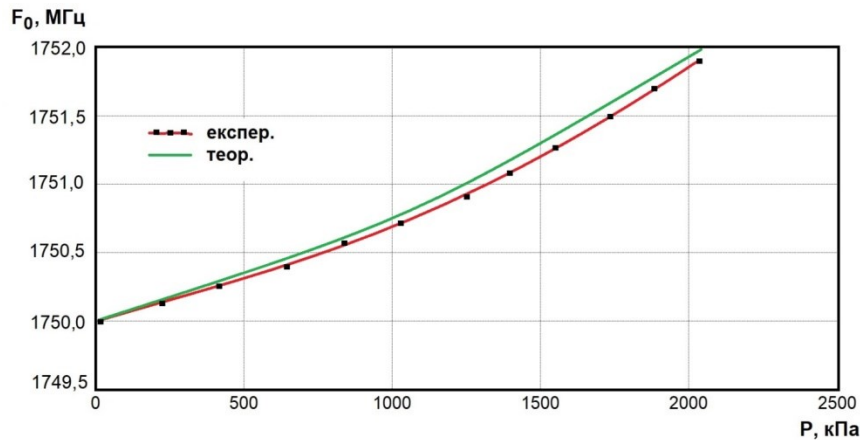


Рис. 5. Розрахункова і експериментальні залежності функції перетворення від тиску

Функція чутливості визначається на основі виразу (32), при цьому вважається, що вихідна напруга сенсора також залежить від тиску. Отже, функція чутливості описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(P) e^{\frac{\Delta E_{gef}(P)}{kT}} \mu_{ef}^{-1/2}(P) a_7 - U_{\sim}^4(P) e^{\frac{2\Delta E_{gef}(P)}{kT}} \mu_{ef}^{-1}(P) a_8 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times a_7 \left[-\frac{1}{2} \mu_{ef}^{-3/2}(P) U_{\sim}^2(P) \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} e^{\frac{\Delta E_{gef}(P)}{kT}} + \left(2U_{\sim}(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} e^{\frac{\Delta E_{gef}(P)}{kT}} + \right. \right.$$

$$\left. + \frac{1}{kT} e^{\frac{\Delta E_{gef}(P)}{kT}} \frac{dE_{gef}(P)}{dP} U_{\sim}^2(P) \right) \mu_{ef}^{-1/2}(P) \left. + a_8 \left(\left[4U_{\sim}^3(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} e^{\frac{2\Delta E_{gef}(P)}{kT}} + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. + 2e^{\frac{2\Delta E_{gef}(P)}{kT}} \frac{1}{kT} \frac{dE_{gef}(P)}{dP} \right) \mu_{ef}^{-1}(P) - \mu_{ef}^{-2}(P) \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} U_{\sim}^4(P) e^{\frac{2\Delta E_{gef}(P)}{kT}} \right],$$

де

$$a_7 = \frac{\tau_p^{1/2}}{2\eta t(qkT)^{1/2} p_n L U_g S}, \quad (34)$$

$$a_8 = \frac{\tau_p}{4\eta^2 t^2 qkT p_n^2 R_g^2 U_g^2 S^2}. \quad (35)$$

На рис. 6 надано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості від тиску

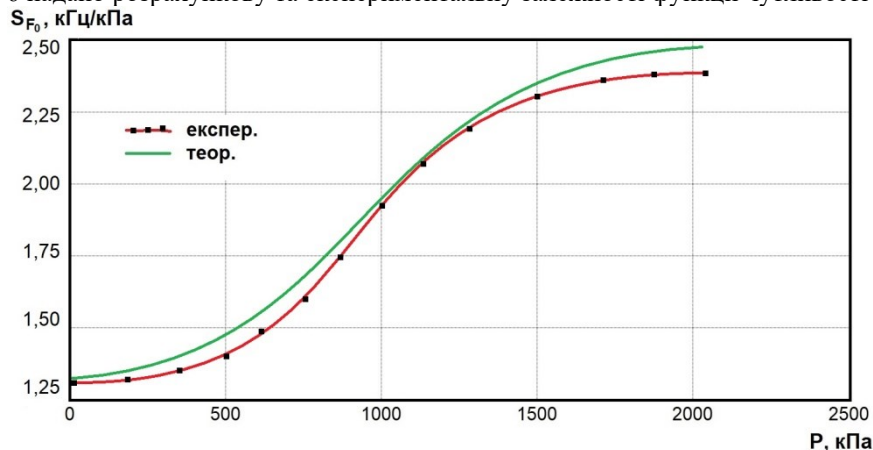


Рис. 6. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості від тиску

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість сенсора змінювалась від 1,31 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа в діапазоні тисків від 0 кПа до 2050 кПа.

Частотний діапазон автогенераторних параметричних сенсорів тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором з первинними тензочутливими елементами типу тензорезистора і тензодіода вибраний в LTE Band 3 (DCS-1800) Uplink: 1710–1785 МГц. Стандарт використовує частотний діапазон 1800 МГц, що збігається із діапазоном GSM-мереж. При створенні 4G-мережі на базі вже побудованої 2G-інфраструктури оператори зазвичай зберігають вихідну мережу і виділяють частину діапазону під нову 4G-мережу. LTE Band 3 зустрічається як у містах, так і у сільській місцевості [23]. Даний вид зв'язку працює в дуплексному режимі FDD з частотним поділом низхідного та висхідного каналу.

Інтернет речі (IoT) перевизначить спосіб взаємодії людей один з одним і з об'єктами, які їх оточують, з метою створення глобальної мережі, що з'єднає всіх і все. Очікується, що використання Інтернет речей дозволить використовувати масовий зв'язок типу машин (mMTC), за допомогою якого пристрої передають та отримують невелику кількість даних, з метою покращення промислових і вимірювальних процесів [24]. Технології радіозв'язку малої потужності (LPWA) з'явилися як рішення для розробки mMTC, що задовольняє вимогам низького енергоспоживання, низької швидкості передачі даних, масштабованості та великої дальності. Використання вузькосмугових Інтернет речей (NB-IoT), як абсолютно нової стільникової технології, дозволить зробити крок вперед у реалізації IoT на основі 5G, а також NB-IoT буде сумісний із системою 4G Long Term Evolution (LTE) та з глобальними системами мобільного зв'язку 2G (GSM) [24–26]. Ця перевага, додана до більш високої ефективності використання спектру, ставить технологію та привілейоване положення для впровадження мереж LPWA [25].

Експериментальні дослідження проведено за допомогою спектроаналізатора Arinst SSA TG-LC. На рис. 7 представлено спектр автогенераторного параметричного сенсора тиску на основі транзисторної мікроелектронної структури в діапазоні DCS-1800 Uplink, частота передачі складає 1750,0 МГц.

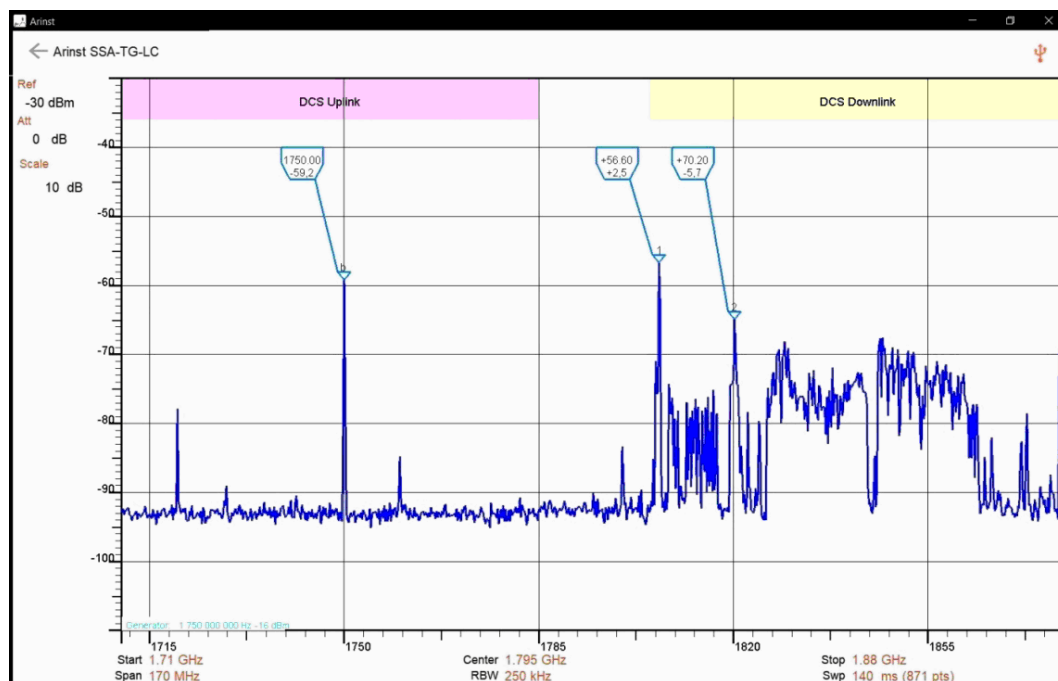


Рис. 7. Спектр автогенераторного параметричного сенсора тиску на основі транзисторної мікроелектронної структури

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором з первинними тензочутливими елементами на базі тензорезистора і тензодіода, причому первинні тензочутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів тиску.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних тензочутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі сенсорів в тиску, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у змінні функції перетворення вносить зміна тиску. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що у свою чергу, змінює вихідну частоту пристроїв. Чутливість сенсорів тиску змінюється від 0,365 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа.

3. Отримані параметричні залежності функцій перетворення сенсорів тиску показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики сенсорів і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі рівнянь Кірхгофа.

У сенсорах тиску з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі та підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Література

1. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Інтелектуальні вимірні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я.І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич [та ін.] ; за ред. Я. І. Лепіха, В. О. Романова. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
3. Датчики : [справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука]. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Невлюдов І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева. – Київ : НАУ, 2018. – 200 с.
5. Dorothee Grieshaber, Robert MacKenzie, Janos V and Erik Reimhult. Electrochemical Biosensors - Sensor Principles and Architectures. *Sensors* 2008, 8, P. 1400–1458.
6. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / [під ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-прес, 2002. – Т. 2. – 475 с.
7. Guo Y., Li B., Zhang Q., He X.T., Sun J.Y. A Further Theoretical Study of Capacitive Pressure Sensors Based on Thin Film Elastic Deflection and Parallel Plate Capacitor: Refined Closed-Form Solution and Numerical Calibration. *Sensors* 2022, 22, 2848. <https://doi.org/10.3390/s22082848>
8. Tai G., Wei D., Su M., Li P., Xie L., Yang J. Force-Sensitive Interface Engineering in Flexible Pressure Sensors: A Review. *Sensors* 2022, 22, 2652.
9. Czako Z., Surdea-Blaga T. Sebestyen G., Hangan A., Dumitrascu D.L., David L., Chiarioni G., Savarino E., Popa S.L. Integrated Relaxation Pressure Classification and Probe Positioning Failure Detection in High-Resolution Esophageal Manometry Using Machine Learning. *Sensors* 2022, 22, 253.
10. Jang J., Jun Y.S., Seo H., Kim M., Park J.U. Motion Detection Using Tactile Sensors Based on Pressure-Sensitive Transistor Arrays. *Sensors* 2020, 20, 3624.
11. Deng F., He Y., Li B., Zuo L., Wu X., Fu, Z. A CMOS Pressure Sensor Tag Chip for Passive Wireless Applications. *Sensors* 2015, 15, 6872–6884.
12. Oleksander V. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, Batyrbek Suleimenov, Tomasz Zyska, Abenov Arman, Akmaral Tleshova, Żaklin Grądz. Frequency pressure transducer with a sensitivity of mem capacitor on the basis of transistor structure with negative resistance. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments* 2017, 1044559
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I. A., Piotr Kisała, Tomasz Zyska, Azamat Annabaev and Kanat Mussabekov. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Poland, R. 93 NR 3/2017. P. 113–116.*
14. Khutorenko S., Osadchuk O., Osadchuk I., Vasilchuk D., Semenets D., Lukin V. Mathematical Model of Piezoelectric Oscillating System with Electrodes of Variable Nonlinear and Constant Linear Air Gap. *Telecommunications and Radio Engineering. 2017. No 76(18). P. 1639–1648. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.50.*
15. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova. Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018; 108086P, 2018, pp. 1–14.*
16. Осадчук О.В. Тензореактивний ефект в біполярних транзисторах / Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 1 (281). – С. 164–170.
17. Осадчук О.В. Тензореактивний ефект у польових транзисторах / Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 2 (283). – С. 163–170.
18. Osadchuk I. A., Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Semenets A. O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 452–457.*
19. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 212–237.
20. Осадчук В.С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / Осадчук В.С., Осадчук А.В. – Вінниця : «Універсум-Вінниця», 1999. – 275 с.
21. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / Викулин И.М., Стафеев В.И. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
22. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / Полякова А.Л. – М. :

Энергия, 1979. – 168 с.

23. Jayantkumar Dorave, Ritesh Sadiwala Uplink and Downlink Variation in Drone Technology for Cloud, Edge, Fog and Smart Dust Integrated IoT Architecture: Demonstrated Over WSNs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2089 (2021) 012023. doi:10.1088/1742-6596/2089/1/012023

24. Mikko Valkama, Jarno Niemelä SAINJU, PRABHAT MAN: LTE performance analysis on 800 and 1800 MHz Bands. Master of Science Thesis. Tampere university of technology, 2012. 82 p.

25. Maria-Gabriella di Benedetto, Pol Serra i Lidón Analysis of the NB-IoT technology towards massive Machine Type Communication / Maria-Gabriella di Benedetto. University Sapienza di Roma, 2018. 69 p.

26. Wang Y.-P. E. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017.

References

1. J. Freiden. Modern sensors. Directory. M.: Technosphere, 2005. 592 p.
2. Intelligent measuring systems based on microelectronic sensors of the new generation / Ya. I. Lepikh, Yu. O. Gordienko, S.V. Dzyadevich [et.]; for ed. J.I. Lepikha, V.O. Romanov. Odesa: Astroprint, 2011. 352 p.
3. Sensors: Reference manual / Under common. ed. V.M. Sharapov, E.C. Polishchuk. M.: Technosphere, 2012. 624 p.
4. Nevlyudov I.S., Tokarev O.V. Automatic control of technological objects. Kyiv: NAU, 2018. 200 p.
5. Dorothee Grieshaber, Robert MacKenzie, Janos V and Erik Reimhult. Electrochemical Biosensors - Sensor Principles and Architectures. *Sensors* 2008, 8, P. 1400–1458.
6. Microelectronic sensors of physical quantities. Ed. Z. Yu. Gotri. Lviv: Liga-press, Vol.2, 2002. 475 p.
7. Guo Y., Li B., Zhang Q., He X.T., Sun J.Y. A Further Theoretical Study of Capacitive Pressure Sensors Based on Thin Film Elastic Deflection and Parallel Plate Capacitor: Refined Closed-Form Solution and Numerical Calibration. *Sensors* 2022, 22, 2848. <https://doi.org/10.3390/s22082848>
8. Tai G., Wei D., Su M., Li P., Xie L., Yang J. Force-Sensitive Interface Engineering in Flexible Pressure Sensors: A Review. *Sensors* 2022, 22, 2652.
9. Czako Z., Surdea-Blaga T. Sebestyen G., Hangan A., Dumitrascu D.L., David L., Chiarioni G., Savarino E., Popa S.L. Integrated Relaxation Pressure Classification and Probe Positioning Failure Detection in High-Resolution Esophageal Manometry Using Machine Learning. *Sensors* 2022, 22, 253.
10. Jang J., Jun Y.S., Seo H., Kim M., Park J.U. Motion Detection Using Tactile Sensors Based on Pressure-Sensitive Transistor Arrays. *Sensors* 2020, 20, 3624.
11. Deng F., He Y., Li B., Zuo L., Wu X., Fu, Z. A CMOS Pressure Sensor Tag Chip for Passive Wireless Applications. *Sensors* 2015, 15, 6872-6884.
12. Oleksander V. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, Batyrbek Suleimenov, Tomasz Zyska, Abenov Arman, Akmaral Tlesheva, Żaklin Grądz. Frequency pressure transducer with a sensitivity of mem capacitor on the basis of transistor structure with negative resistance. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 1044559
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I. A., Piotr Kisala, Tomasz Zyska, Azamat Annabaev and Kanat Mussabekov Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, Poland, R. 93 NR 3/2017. P. 113–116.
14. Khutomenko S., Osadchuk O., Osadchuk I., Vasilchuk D., Semenets D., Lukin V. Mathematical Model of Piezoelectric Oscillating System with Electrodes of Variable Nonlinear and Constant Linear Air Gap. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. No 76(18). P. 1639–1648. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.50.
15. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018; 108086P, 2018, pp. 1–14.
16. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Tensoreactive effect in bipolar transistors. *Herald of the Khmelnytsky National University*, 2020. № 1 (281). P. 164-170.
17. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Tensoreactive effect in field-effect transistors. *Herald of the Khmelnytsky National University*, 2020. № 2 (283). P. 163-170.
18. Osadchuk I. A., Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Semenov A. O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 452-457.
19. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 212-237.
20. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. 275 p.
21. Vikulin I.M., Stafeyev V.I. Physics of semiconductor devices. Moscow: Radio and communication, 1990. 264 p.
22. Polyakova A.L. Deformation of semiconductors and semiconductor devices. M.: Energy, 1979. 168 p.
23. Jayantkumar Dorave, Ritesh Sadiwala Uplink and Downlink Variation in Drone Technology for Cloud, Edge, Fog and Smart Dust Integrated IoT Architecture: Demonstrated Over WSNs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2089 (2021) 012023. doi:10.1088/1742-6596/2089/1/012023
24. Mikko Valkama, Jarno Niemelä SAINJU, PRABHAT MAN: LTE performance analysis on 800 and 1800 MHz Bands. Master of Science Thesis. Tampere university of technology, 2012. 82 p.
25. Maria-Gabriella di Benedetto, Pol Serra i Lidón Analysis of the NB-IoT technology towards massive Machine Type Communication / Maria-Gabriella di Benedetto. University Sapienza di Roma, 2018. 69 p.
26. Wang Y.-P. E. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017.

ЛЕВКІН Д. А.

Державний біотехнологічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1980-4426>e-mail: dimaevkin23@gmail.com

АРХІТЕКТОНІКА РОЗРАХУНКОВИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Дослідження статті стосуються вдосконаленню розрахункових математичних моделей технологічних, біотехнологічних і економічних систем. Під час математичного моделювання для збільшення точності розрахунку параметрів складних систем потрібно збільшити кількість врахованих параметрів. Це призводить до необхідності розв'язання нелокальних крайових задач з нестационарними диференціальними рівняннями, для доказу коректності яких неможливо застосувати традиційну теорію існування та єдиності розв'язку. Слід відзначити, що після проведення архітектоники крайових задач припускають існування їх розв'язку, необхідно лише довести його єдиність. Для доказу коректності розрахункових математичних моделей потрібно, або узагальнити параметри функції мети і використати досить наближені обмеження, що, в свою чергу, дозволить звести крайову задачу до стандартного виду і її коректність не буде викликати сумнівів, або запропонувати методику для доказу коректності крайових задач для певних диференціальних рівнянь, яка враховуватиме специфічні особливості модельованих процесів. В залежності від виду диференціальних рівнянь, які описують фізичні і економічні процеси в модельованих системах, для обґрунтування коректності крайових задач потрібна окрема методика.

В статті досліджені умови коректності крайових задач для диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Доведено, що для довільних однорідних диференціальних рівнянь існує відповідна крайова задача. Наведене визначення параболічних крайових задач в термінах, які використовують обмеження зверху на фундаментальну функцію розв'язку. Отримані умови, які вказують на існування і на неможливість існування, відповідно, параболічної крайової задачі. Отримані результати дозволять підвищити точність реалізації основної оптимізаційної задачі підвищення якості модельованих процесів.

Ключові слова: архітектоніка, крайові задачі, коректність, диференціальні рівняння.

Dmytro LEVKIN

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

ARCHITECTONICS OF CALCULATED MATHEMATICAL MODELS UNDER UNCERTAINTY

This article concerns the improvement of calculated mathematical models of technological, biotechnological, and economic systems. It is necessary to increase the number of considered parameters to increase the accuracy of calculating the parameters of complex systems during mathematical modeling. This leads to the need to solve nonlocal boundary value problems with non-stationary differential equations, to prove the correctness of which it is impossible to apply the traditional theory of existence and unity of solution. Note that after the architecture of boundary value problems assumes the existence of their solution, it is only necessary to prove its uniqueness. To prove the correctness of calculated mathematical models requires neither generalizing the parameters of the goal function and using approximate constraints, which, in turn, will reduce the boundary value problem to a standard form and its correctness will not be in doubt, nor propose a method to prove the correctness of boundary value certain differential equations, which will consider the specific features of the modeled processes. A separate technique must substantiate the correctness of boundary value problems depending on the type of differential equation that describes the physical and economic processes in the simulated systems.

This article studied the conditions for the correctness of boundary value problems for differential equations with constant coefficients. It is proved that there is a corresponding boundary value problem for arbitrary homogeneous differential equations. It is defined the parabolic boundary value problems in terms that use constraints from above on the fundamental solution function. The conditions were obtained under which the parabolic boundary value problem exists and cannot exist, respectively. The obtained results will increase the accuracy of the main optimization task of improving the quality of simulated processes.

Keywords: architectonics, boundary value problems, correctness, differential equations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В теорії диференціальних рівнянь вагоме значення займають питання існування і єдиності розв'язку крайових задач. Водночас, не виникає сумнівів в існуванні розв'язку, питання ж полягає в його єдиності. Не всі методи і твердження, які застосовують для доказу коректності крайових задач з диференціальними рівняннями 2-го порядку, можуть бути використані для доказу коректності крайових задач з диференціальними рівняннями вищого порядку.

В статті наведений підхід до обґрунтування коректності крайових задач з диференціальними рівняннями 2-го порядку. Результати досліджень можуть бути застосовані для обґрунтування коректності крайових задач, які описують стан модельованих технічних, біотехнологічних, економічних та інших складних систем. Автор статті вважає, що їх доцільно використати для обґрунтування коректності розрахункових математичних моделей для інших систем з розподіленими параметрами.

Аналіз досліджень та публікацій

Наведемо огляд наукових публікацій, які стосуються математичного моделювання і оптимізації технічних [1–5] і економічних систем [6–8]. В роботах [1–3] наведені математичні моделі і методи для

здійснення розрахунку і оптимізації великої кількості технічних систем. Розв'язанню прикладних задач присвячені результати публікацій [4, 5]. В публікації [4] наведені математичні моделі і методи розрахунку параметрів технологічного процесу термічної дії на листовий метал. Детально досліджені можливості трибосистем пристосовуватись до умов експлуатації в публікації [5].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є отримати умови коректності однорідних крайових задач в просторі нескінченно диференційованих функцій степеневого зростання.

Виклад основного матеріалу

Для довільних символів псевдодиференціальних операторів $A_k(s)$ з простору нескінченно-диференційованих функцій степеневого зростання існують символи $B_k(s)$, такі, що однорідна крайова задача

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = A_k \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) u(x, t); \\ u(x, t_k - 0) = u(x, t_k + 0); \\ \sum_{k=0}^n B_k \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) u(x, t_k) = \varphi(x) \end{cases} \quad (1)$$

коректна в просторі узагальнених функцій.

Розглянемо фундаментальну функцію:

$$Q(s, t) = \begin{cases} \exp \{ t \tilde{A}_1(s) \} \Delta^{-1}(s); \\ \exp \{ (t - t_1) \tilde{A}_2(s) \} \Delta^{-1}(s) \exp \{ t \tilde{A}_1(s) \}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \exp \{ (t - t_{n-1}) \tilde{A}_n(s) \} \Delta^{-1}(s) \exp \{ t_1 \tilde{A}_1(s) + \dots + (t_{n-1} - t_{n-2}) \tilde{A}_{n-1}(s) \}, \end{cases} \quad (2)$$

де $\tilde{A}_k(s)$ – перетворення Фур'є символів псевдодиференціальних операторів $A_k(s)$, $k = 1, \dots, n$;

$$\Delta(s) = \tilde{B}_0(s) + \tilde{B}_1(s) \exp \{ t_1 \tilde{A}_1(s) \} + \dots + \tilde{B}_n(s) \exp \{ t_1 \tilde{A}_1(s) + (t_2 - t_1) \tilde{A}_2(s) + \dots + (T - t_{n-1}) \tilde{A}_n(s) \} \neq 0.$$

Для функції $Q(s, t)$ (2) виконане обмеження:

$$Q(s, t) \leq c_k (1 + |s|)^{p_k} \exp \{ -h_k \cdot r_k(t) |s|^{p_k} \} \quad \text{при } k = 1, \dots, n \quad (3)$$

з деякими додатніми c_k , r_k , h_k і p_k , за умови, що: $p_1 = \{t, (t - t_1)\}$ при $t \in [0; t_1]$, $p_2 = \{(t - t_1), (t_2 - t)\}$ при $t \in [t_1; t_2]$ і так до $p_n = \{(t - t_{n-1}), (t_n - t)\}$ при $t \in [t_{n-1}; t_n]$.

Отримали висновок. Якщо виконане обмеження зверху $|\operatorname{Re} \tilde{A}_k(s)| \geq c_k |s|^{h_k} - r_k$, при $k = 1, \dots, n$ і додатніх c_k , h_k , дійсних r_k , тоді існує параболічна крайова задача (1). Якщо для функцій $A_k(s)$, $k = 1, \dots, n$ виконане обмеження (3), і крайова задача (1) коректна в просторі узагальнених функцій, то зазначена крайова задача буде параболічною і для будь-якої обмеженої функції φ існує нескінченно-диференційований за x розв'язок $u(x, t)$ для будь-якого $t \in (t_{k-1}; t_k)$. Також, якщо існує дійсна послідовність s_v , для якої $s_v \rightarrow \infty$ і $|\operatorname{Re} \tilde{A}_k(s_v)| \leq \text{const}$ при $k = 1, \dots, n$, тоді не існує параболічної крайової задачі. Наведені дослідження ґрунтуються на результатах публікацій [9–11] і можуть бути використані для обґрунтування коректності багатьох розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті отримані умови коректності однорідних крайових задач, а також умови, які вказують на існування і на неможливість існування, відповідно, параболічної крайової задачі в просторі узагальнених функцій. Результати публікації доцільно застосувати для обґрунтування коректності розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей, які описують стан модельованих технічних, біотехнологічних і економічних систем. Це дасть можливість підвищити якість розв'язання основної оптимізаційної задачі підвищення ефективності функціонування складних систем.

Література

1. Стоян Ю.Г. Оптимизация технических систем с источниками физических полей / Ю.Г. Стоян, В.П. Путятин. – К. : Наук. думка, 1988. – С. 44–48.

2. Asrorov F. Finding of bounded solutions to linear impulsive systems / F. Asrorov, V. Sobchuk, O. Kurylko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 6. No. 4 (102): Mathematics and Cybernetics - applied aspects. – P. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178635>
3. Зайцев Є.П. Математичне моделювання двічі нелінійної задачі теплопровідності трансверсально-ізотропного термочутливого циліндра під впливом зонального високотемпературного теплообміну / Зайцев Є.П. // *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. – Київ, 2021. – Т. 32(71). № 2. Ч. 1. – С. 31–38. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/07>
4. Scoblo T.S. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation / T.S. Scoblo, O.Y. Klochko, V.N. Romanchenko, E.L. Belkin // *Letters on Materials*. – 2021. – Vol. 11. No. 1. – P. 22–27. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-22-27>
5. Vojtov V.A. Criteria for evaluation of tribus system practices and its communication with tribological characteristics / V.A. Vojtov, A.SH. Bekirov, A.V. Voitov // *Problems of Tribology*. – 2018. – Vol. 88. No. 2. – P. 35–42.
6. Tytarchuk I. Innovations financing in the agricultural sector. / I. Tytarchuk, Y. Nehoda, I. Shalyhina, N. Bazhanova, O. Horbachova, L. Rybina. // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 11. Issue. 4. – Pp. 246–255
7. Potyshniak O. Assessment of the effectiveness of the strategic management system of investment activities of companies / O. Potyshniak, L. Dobuliak, V. Filippov, Y. Malakhovskyi, O. Lozova // *Academy of Strategic Management Journal*. – 2019. – Vol. 18. Issue. 4. – P. 1–5.
8. Fedicheva K. Controlling, monitoring and diagnostics in identifying effective management practices of agricultural enterprises. / K. Fedicheva, O. Kochetkov, S. Honcharenko, R. Levkina, M. Bichevin. // *Agricultural and Resource Economics*. – 2021. – Vol. 7. Issue. 2. – Pp. 200–218. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.313636>
9. Макаров А.А. Многоточечная краевая задача для псевдодифференциальных уравнений в полислое / А.А. Макаров, Д.А. Левкин // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка»*. – Х. : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2014. – № 1120. Вип. 69. – С. 64–74. <https://doi.org/10.26565/2221-5646-2014-1120-04>
10. Skoblo T.S. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, O.V. Saichuk, O.Y. Klochko, D.A. Levkin // *Materials Science*. – 2020. – Vol. 56. Issue. 3. – P. 347–358.
11. Мегель Ю.Е. Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы / Ю.Е. Мегель, В.П. Путятин, Д.А. Левкин, А.В. Левкин // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С. 60–64.

References

1. Stojan Ju.G. Optimizacija tehničkih sistem s istochnikami fizicheskikh polej / Ju.G. Stojan, V.P. Putjatin. – K. : Nauk. dumka, 1988. – S. 44–48.
2. Asrorov F. Finding of bounded solutions to linear impulsive systems / F. Asrorov, V. Sobchuk, O. Kurylko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 6. No. 4 (102): Mathematics and Cybernetics - applied aspects. – P. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178635>
3. Zaitsev Ye.P. Matematychnе modeliuвання dvichі nelineinoi zadachi teploprovіdnosti transversalno-izotropnoho termochutlyvoho tsylindra pid vplyvom zonalnoho vysokotemperaturnoho teploobminu / Zaitsev Ye.P. // *Vcheni zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: «Tekhnichni nauky»*. – Kyiv, 2021. – T. 32(71). № 2. Ch. 1. – S. 31–38. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/07>
4. Scoblo T.S. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation / T.S. Scoblo, O.Y. Klochko, V.N. Romanchenko, E.L. Belkin // *Letters on Materials*. – 2021. – Vol. 11. No. 1. – P. 22–27. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-22-27>
5. Vojtov V.A. Criteria for evaluation of tribus system practices and its communication with tribological characteristics / V.A. Vojtov, A.SH. Bekirov, A.V. Voitov // *Problems of Tribology*. – 2018. – Vol. 88. No. 2. – P. 35–42.
6. Tytarchuk I. Innovations financing in the agricultural sector. / I. Tytarchuk, Y. Nehoda, I. Shalyhina, N. Bazhanova, O. Horbachova, L. Rybina. // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 11. Issue. 4. – Pp. 246–255.
7. Potyshniak O. Assessment of the effectiveness of the strategic management system of investment activities of companies / O. Potyshniak, L. Dobuliak, V. Filippov, Y. Malakhovskyi, O. Lozova // *Academy of Strategic Management Journal*. – 2019. – Vol. 18. Issue. 4. – P. 1–5.
8. Fedicheva K. Controlling, monitoring and diagnostics in identifying effective management practices of agricultural enterprises. / K. Fedicheva, O. Kochetkov, S. Honcharenko, R. Levkina, M. Bichevin. // *Agricultural and Resource Economics*. – 2021. – Vol. 7. Issue. 2. – Pp. 200–218. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.313636>
9. Makarov A.A. Mnogotochnaya kraevaya zadacha dlja psevdodifferencial'nykh uravnenij v polislloe / A.A. Makarov, D.A. Levkin // *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya: «Matematika, prikladna matematika i mehanika»*. – H. : HNU im. V.N. Karazina, 2014. – № 1120. Vip. 69. – S. 64–74. <https://doi.org/10.26565/2221-5646-2014-1120-04>
10. Skoblo T.S. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, O.V. Saichuk, O.Y. Klochko, D.A. Levkin // *Materials Science*. – 2020. – Vol. 56. Issue. 3. – P. 347–358.
11. Megel' Ju.E. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija parametrov dejstvija lazernogo lucha na mnogoslojnye biomaterialy / Ju.E. Megel', V.P. Putjatin, D.A. Levkin, A.V. Levkin // *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»*. Zbimik naukovih prac'. Serija: «Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi». – H. : NTU «HPI», 2017. – № 20(1242). – S. 60–64.

КУТИН В. М.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5667-7323>e-mail: vmkytin@gmail.com

КУТИНА М. В.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7185-6795>e-mail: mkytina@gmail.com

ШПАЧУК О. О.

ВП «Хмельницька атомна електростанція»

<https://orcid.org/0000-0001-6946-2551>e-mail: shpachuk2@gmail.com

МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ БЛОКУ «ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР»

Значний ступінь зношення основного електротехнічного обладнання схеми видачі потужності (синхронні генератори, комплекти екрановані струмопроводи, трансформатори) теплових та атомних електричних станцій, впровадження політики продовження строків експлуатації існуючих енергоблоків електростанцій, а також поступове впровадження стратегії ремонту обладнання за технічним станом, обумовлює актуальність питання розробки нових та вдосконалення існуючих систем контролю технічного стану електрообладнання загалом та його ізоляційних характеристик зокрема.

Засоби діагностування ізоляції, засоби релейного захисту та інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в даний час на енергоблоках електричних станцій, не дають можливості відстежувати зміну таких електричних параметрів ізоляції електрообладнання як опір та ємність ізоляції відносно землі та тангенс кута діелектричних втрат, що унеможливує виявлення дефектів в ізоляції на ранній стадії їх розвитку. Засоби релейного захисту можуть бути нечутливими до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі та при симетричному зниженні параметрів ізоляції обмотки статора, а також хибно спрацьовувати при пусках блоків через несиметрію напруг у фазах генераторів.

В роботі запропоновано метод контролю технічного стану ізоляції електрообладнання в колі блоку «генератор-трансформатор», що ґрунтується на комбінованому накладанні постійного струму та змінного струму з частотою меншою за промислову, контролі струму розряду попередньо зарядженого конденсатора та контролі розтікання змінного струму за допомогою котушок Роговського. Запропонований метод дозволить виявляти як стрибкоподібну, так і поступову зміну технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор», покращити якість планування ремонтних робіт та пришвидшить пошук несправних елементів у випадку виникнення пошкодження.

Ключові слова: синхронний генератор, трансформатор напруги, струмопровід, пошкодження ізоляції, інформаційно-вимірювальна система.

Vasil KUTIN, Marina KUTINA
Vinnytsia National Technical University
Oleksandr SHPACHUK
Khmelnyskyi Nuclear Power Plant

METHOD OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF INSULATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF THE GENERATOR-TRANSFORMER UNIT

Significant wear of the main electrical equipment of the power supply scheme (synchronous generators, complete shielded power lines, transformers) of thermal and nuclear power plants, implementation of the policy of extending the service life of existing power units, and gradual implementation of equipment repair strategies according to technical condition determines the relevance of development of new and improvement of existing systems for monitoring the technical condition of electrical equipment in general and its insulation characteristics in particular. Insulation diagnostics, relay protection devices and information-measuring systems currently operated on power units do not allow tracking changes in electrical insulation parameters of electrical equipment such as insulation resistance and capacitance relative to ground and tangent angle of dielectric loss detection that makes detection of defects in isolation at an early stage of their development impossible. Relay protection devices can be insensitive to single-phase earth faults of the stator winding near the neutral and with a symmetrical decrease in the insulation parameters of the stator winding, as well as malfunction when starting units due to voltage asymmetry in generator phases.

The method of control of technical condition of electrical equipment insulation in the generator-transformer unit circuit is proposed, which is based on combined superimposition of direct current and alternating current with frequency less than industrial, control of discharge of precharged capacitor and control of alternating current flow with Rogovsky coils. The proposed method will detect both abrupt and gradual changes in the technical condition of the insulation of electrical equipment of the "generator-transformer" unit, improve the quality of planning of repair work and speed up the search for faulty elements in case of damage.

Key words: synchronous generator, voltage transformer, current conductor, insulation damage, information-measuring system.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в даний час на енергоблоках електричних станцій забезпечують контроль значного переліку технологічних параметрів, що характеризують режим

роботи синхронних генераторів до яких входять: електричні параметри (струми у фазах, лінійні чи фазні напруги на виводах машин, генерована потужність, контроль рівня часткових розрядів в ізоляції обмотки статора), теплотехнічні параметри (температура стержнів статорної обмотки та обмотки ротора, осердя статора, температура і витрати охолоджувача; температура підшипників, оливи та води в системі охолодження), механічні параметри (рівні вібрації статора та підшипників) а також параметри, що характеризують стан чи положення технологічної арматури та допоміжного устаткування. Проте такі інформаційно вимірювальні системи не дають можливості відстежувати зміну таких електричних параметрів ізоляції синхронних генераторів та іншого устаткування блоку «генератор – трансформатор» як опір та ємність ізоляції обладнання відносно землі, а також тангенс кута діелектричних втрат, що унеможливає виявлення погіршення технічного стану ізоляції на ранній стадії його розвитку.

Сучасні пристрої релейного захисту надають захист від усіх видів пошкоджень електрообладнання блоку «генератор – трансформатор» і ненормальних режимів їх роботи, забезпечують високий рівень селективності, чутливості та, завдяки мікропроцесорній елементній базі, швидкодії. Проте вони позбавлені можливості виявлення погіршення стану ізоляції на ранній стадії розвитку дефектів.

Виходячи з описаного вище існує актуальна науково-практична задача з розробки та впровадження системи контролю електричних параметрів ізоляції в схемі видачі потужності блоку «генератор-трансформатор», вирішення якої дозволить підвищити ефективність експлуатації енергоблоків завдяки забезпеченню оперативного та ремонтного персоналу достовірною інформацією про технічний стан ізоляції електрообладнання.

В даній роботі об'єктом дослідження є процеси зміни технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор – трансформатор». Предметом дослідження є методи і засоби контролю технічного стану електричних параметрів ізоляції електрообладнання та релейного захисту електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» від електричних пошкоджень.

Метою дослідження є розширення функціональних можливостей системи контролю технічного стану ізоляції шляхом застосування комбінованого методу контролю, що ґрунтується на використанні накладання на контрольоване коло постійного та змінного струму частотою 20 Гц і струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, що дозволяє виявити поступову та стрибкоподібну зміну активного опору ізоляції статора, екранованого струмопроводу та обмотки трансформатора напруги вмонтованого у струмопровід.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботах [1, 2] розглянуто принципи побудови систем релейного захисту та розрахунку уставок спрацювання. У [3] показано принципи побудови релейного захисту електрообладнання в мережах з компенсованою нейтраллю. В роботах [4, 5] висвітлено особливості побудови релейного захисту елементів електричних систем загалом та синхронних генераторів зокрема. У публікації [6] висвітлено досвід використання сенсорів типу котушок Роговського у побудові систем релейного захисту.

Результати дослідження

Для виконання поставленої задачі пропонується використати комбінований метод накладання постійного струму, використання енергії попередньо зарядженого конденсатора, накладання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, та контролю протікання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, в обладнанні блоку «генератор-трансформатор» за допомогою сенсорів типу котушок Роговського. Реалізація накладання постійного струму та використання енергії попередньо зарядженого конденсатора необхідна для виявлення стрибкоподібної зміни стану ізоляції та визначення перехідного опору в місці виникнення пошкодження типу однофазного замикання на землю. Накладання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, та контроль протікання даного струму на виводах електрообладнання забезпечить визначення та контроль зміни активного опору та ємності ізоляції електрообладнання при поступовій зміні стану ізоляції. Контроль протікання змінного струму з частотою, що нижча за номінальну, можна реалізувати з улаштуванням сенсорів типу котушок Роговського наступним чином:

- для синхронного генератора – на лінійних виводах та виводах нейтральної точки;
- для трансформаторів напруги що підключені до мережі генераторної напруги – на частині корпусу, що контактує із заземленими конструкціями;
- для трансформаторів напруги, що вбудовані в комплектний екранований струмопровід – на лінійних виводах та частині корпусу, що контактує з екраном струмопроводу;
- для струмопроводу – на екранах струмопроводу поблизу місця заземлення струмопроводу перед алюмінієвими перемичками, що з'єднують екрани між собою.

Зазначене розташування сенсорів дозволить реалізувати пофазний контроль стану ізоляції основного електрообладнання блоку генератор-трансформатор, а у випадку виникнення пошкодження, прискорити пошук пошкодженого елемента в схемі блоку «генератор – трансформатор». Для захисту від впливу на результати вимірювань завад необхідним буде використання фільтрів верхніх частот на виводах трансформаторів напруги та сенсорах типу котушок Роговського.

Запропонована система контролю ізоляції працює таким чином. Блок живлення U2 забезпечує живлення блоків обробки сигналу напруги частотою 20 Гц U9, обробки сигналу струму частотою 20 Гц U6, обробки сигналів від сенсорів типу котушок Роговського U1, обробки сигналу постійного струму, що накладається на статорну обмотку U8, обробки сигналу струму розряду попередньо зарядженого конденсатора U7, а також блоку керування U10, що здійснює керування системою контролю ізоляції та формує вихідні сигнали для оперативного персоналу енергоблоку. Сигнал змінного струму з частотою 20 Гц, від блоку накладання змінного струму U4 через смуговий фільтр U3 та резистор R_1 вводиться в схему блоку генератора-трансформатор через трансформатор напруги TV. До блоку обробки сигналу напруги частотою 20 Гц U9 через резистор R_2 від смугового фільтра U3 підводиться напруга U_5' , що пропорційна напрузі частотою 20 Гц, яка накладається. До блоку обробки сигналу струму частотою 20 Гц U6 через трансформатор струму ТА1 підводиться струм I_5' , що пропорційний струму I_2' , в колі з джерелом накладеної напруги змінного струму частотою 20 Гц. Сигнали струму від сенсорів типу котушок Роговського та блоків фільтрів і підсилювачів U1.1-U1.18, що розташовані на обладнанні в схемі блоку генератор-трансформатор подаються до блоку обробки сигналів струму від сенсорів струму типу котушок Роговського U1. Сигнал постійного струму формується блоком живлення U6 та через резистори R_4 , R_6 та вимірювальні шунти R_3 , R_5 підводиться до обмотки статора генератора через нейтральну точку обмотки високої напруги TV. Обробка сигналу здійснюється блоком U8. Сигнал струму розряду попередньо зарядженого конденсатора C_2 формується в результаті виникнення раптового замикання на землю та надходить на обробку до блоку U9. Ємність C_1 та нелінійний обмежувач перенапруг FV1 встановлюються для забезпечення захисту від завад та можливих перенапруг.

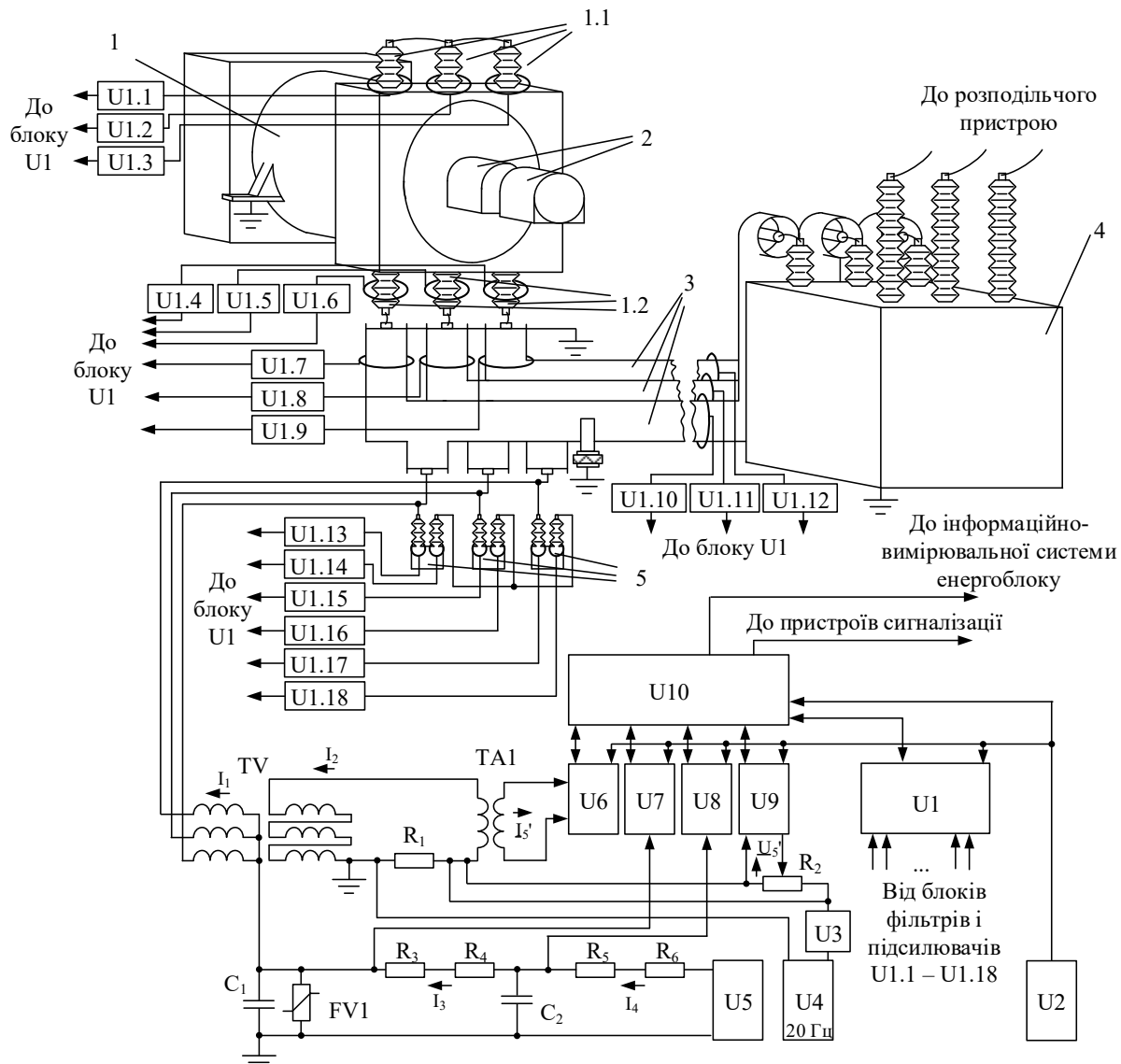


Рис. 1. Структурна схема системи контролю ізоляції, де 1 – генератор, 1.2 – лінійні виводи генератора, 1.1 – виводи нейтральної точки генератора; 2 – збудники генератора; 3 – комплектний екранований струмопровід; 4 – блочний трансформатор; 5 – трансформатор напруги

При справному стані ізоляції обладнання блоку «генератор-трансформатор» струм частотою 20 Гц, що стікає через ізоляцію на землю незначний. При поступовому зниженні опору ізоляції контрольованого

обладнання збільшується струм частотою 20 Гц, що стікає через ізоляцію на землю. Дану зміну струму фіксують сенсори типу котушок Роговського та через блоки фільтрів та підсилювачів U1.1-U1.18 передають до відповідного блоку обробки U1, а далі до блоку керування U10.

Розрахунок параметрів ізоляції електрообладнання здійснюватиметься за допомогою визначення різниці струмів частотою 20 Гц на лінійних виводах та виводах нульової точки обладнання з врахуванням напруги сигналу частотою 20 Гц та кутів між ними за такими співвідношеннями:

$$Z_{iz} = (k \cdot U_5') / (I_{UL} \cdot e^{j\omega t + \varphi_L} - I_{UN} \cdot e^{j\omega t + \varphi_N}), \quad (1)$$

де Z_{iz} – повний опір ізоляції фази електрообладнання відносно землі; k – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги; U_5' – напруга, що пропорційна напрузі частотою 20 Гц, яка накладається на статорну обмотку; I_{UL} – струм частотою 20 Гц на лінійних виводах обладнання; I_{UN} – струм частотою 20 Гц на виводах нульової точки обладнання; ω – кутова частота; φ_{UL} – кут зсуву фази струму на лінійних виводах обладнання; φ_N – кут зсуву фази струму на виводах нейтральної точки обладнання

$$R_{iz} = \operatorname{Re}(Z_{iz}), \quad (2)$$

де R_{iz} – активний опір ізоляції електрообладнання відносно землі;

$$X_{iz} = \operatorname{Im}(Z_{iz}), \quad (3)$$

де X_{iz} – реактивний опір ізоляції електрообладнання відносно землі;

$$C_{iz} = 1/(\omega \cdot X_{iz}), \quad (4)$$

де C_{iz} – ємність ізоляції електрообладнання відносно землі

$$\operatorname{tg} \delta = 1/(C_{iz} \cdot \omega \cdot R_{iz}), \quad (5)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат ізоляції.

Розраховані значення опору ізоляції обладнання відносно землі, ємності ізоляції відносно землі та тангенсу кута діелектричних втрат, що надходять до інформаційно-вимірювальної системи енергоблоку дозволять організувати додатковий контроль за станом обладнання з погіршеними значеннями параметрів ізоляції, запланувати додаткові обсяги ремонтних робіт, завчасне виведення обладнання в ремонт без його пошкодження, або полегшать пошук пошкодженої ланки в колі «генератор-трансформатор».

У випадку виникнення раптового замикання на землю в перші моменти струм через R_5 , R_6 змінюватися не буде, натомість на струм I_4 , що протікає через резистор R_4 буде накладатися струм розряду попередньо зарядженого конденсатора C_2 . Максимальне значення результуючого струму I_3 через резистор R_4 і шунт R_3 зворотно пропорційне перехідному опору в місці замикання на землю R_p

$$R_p = (s + fI_3) / (1 + gI_3 + hI_3^2), \quad (6)$$

де I_3 – сигнал струму розряду попередньо зарядженого конденсатора; s, f, g, h – коефіцієнти, що обумовлюються параметрами резисторів, а також активним та індуктивним опорами первинної обмотки трансформатора напруги.

Таким чином, можна реалізувати контроль ізоляції генератора та трансформаторів напруги, що вбудовані в струмопровід. Параметри ізоляції комплектного екранованого струмопроводу можна визначити як різницю струмів частотою 20 Гц, яка накладається системою контролю ізоляції блоку «генератор-трансформатор» та струмів, що фіксують сенсори які встановлені на решті контрольованого обладнання в колі «генератор трансформатор», з врахуванням напруги сигналу частотою 20 Гц та кута між ними.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Реалізація контролю електричних параметрів ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» дозволить підвищити ефективність експлуатації енергоблоків завдяки забезпеченню оперативного та ремонтного персоналу достовірною інформацією про технічний стан обладнання та забезпечить можливість прогнозування зміни технічного стану та реалізації ремонту і обслуговування електрообладнання за технічним станом.

2. У випадку виникнення пошкодження на обладнанні блоку «генератор-трансформатор», запропонована система дозволяє оперативно виявити пошкоджений елемент, що зменшить тривалість відновлювальних робіт та недовідпуск електроенергії.

Література

1. Sleva A. M. Protective Relay Principles. CRC Press, 2009, 368 p. ISBN 9780824753726.
2. Thomas E. Baker Electrical Calculations and Guidelines for Generating Stations and Industrial Plants. CRC Press, 2012, 274 p. ISBN 978-1-4398-5521-8.
3. Loos M. Single Phase to Ground Fault in Compensated Network. Lambert Academic Publishing, 2014, 228 p.
4. Reimert D. Protective Relaying for Power Generation Systems. Boca Raton, Florida, USA,

Taylor&Francis Group CRC Press, 2005, 592 p.

5. Thompson M. IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators. Second Edition. Special publication of the IEEE. 2011. 113 p.

6. Kojovic L. A. Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying. IEEE PSRC Special Report. 2010. 72 p.

ЛАРИН О. О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-5721-4400>e-mail: alexeya.larin@gmail.com

ПОТОПАЛЬСЬКА К. Є.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-8184-4229>e-mail: ks.potopalskaya@gmail.com

ГРІНЧЕНКО Є. М.

Харківський національний університет внутрішніх справ

<https://orcid.org/0000-0002-3973-9078>e-mail: gengrinchenko@gmail.com

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ НАСОСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ З ПРОГНОЗОВАНИМ СТОНШЕННЯМ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ВНАСЛІДОК КОРОЗІЇ

У даній роботі розглянуто питання оцінки залишкової міцності відцентрового насоса, що працює в понад проектний термін експлуатації в лінії насосів енергоблока АЕС. Наведено результати теоретичних досліджень його напружено-деформованого стану з урахуванням зміни геометрії корпусних деталей. Розроблено розрахункові тривимірні СЕ- моделі, які враховують фактичну геометрію деталей насоса і прогноз її можливої зміни на період продовженого ресурсу. Оцінка статичної міцності проводилась для основного експлуатаційного режиму роботи насоса (при нормальних умовах експлуатації). З урахуванням прогнозованих значень відсотку стоншення стінки корпусу насоса було досліджено статистичне НДС конструкції, на основі якого визначено параметр пошкоджуваності та ймовірність безвідмовної роботи конструкції.

Ключові слова: ресурс, корозійне зношення, надійність, енергетичне обладнання, залишкова міцність.

Oleksiy LARIN, Ksenia POTOPALSKA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Yevgen GRINCHENKO

Kharkiv National University of Internal Affairs

ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE-TIME OF THE ELEMENTS OF THE CENTRIFUGAL PUMP OF THE ENERGY INSTALLATION ON THE BASIS OF STATISTICAL ASSESSMENT OF FATIGUE WITH PREDICTED WEAR DUE TO CORROSION

In this article, the residual resource of a centrifugal pump was anticipated, which operates an overestimated resource in the pumping line of a nuclear power plant. The results of theoretical and numerical modeling of its stress-strain state with a change in the geometry of the hull parts are presented. Three-dimensional FE models have been developed that take into account the actual geometry of pump parts, as well as a forecast of their possible changes during further operation. The change in the geometry of the structure is taken into account on the basis of extrapolation of data on the thickness of the hull walls obtained over a long service life. Calculations to determine the static strength are made for the main operating mode of the pump (under normal operating conditions). In places of welds, the cyclic strength was checked separately, while taking into account the decrease in their strength due to an increase in equivalent stress amplitudes by dividing them by the coefficient of reduction in the strength of the weld. The process of thinning of the wall of the pump housing under the action of erosive-corrosive wear is modeled. This process is random, so it was modeled taking into account the equations of wear growth kinetics. As a result of the research, the damage parameter and the probability of failure-free operation of the structure were obtained. These parameters are determined taking into account the predicted values of the percentage thinning of the pump housing wall and the obtained characteristics of the statistical deformation state of the structure.

Keywords: life-time, corrosion wear, reliability, power engineering equipment, residual strength.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В основі енергоефективності та енергетичної безпеки України знаходяться питання, які пов'язані із транспортуванням енергоносіїв. Важливими елементами системи, що відіграють значну роль у забезпеченні потреб кінцевого споживача є супровідні енергетичні машини, зокрема відцентрові насоси [1, 2]. Дані конструкції, використовуються на АЕС та відчувають дію агресивного середовища впродовж експлуатації, що сприяє стоншенню їх стінок. Такі конструкції були введені в експлуатацію понад 40 років, тому за проектними нормативами вони вже відпрацювали свій ресурс. Але моніторинг їхнього стану показує, що вони здатні надалі бути в експлуатації. Отже для безпечної подальшої експлуатації оцінка залишкової міцності відцентрового насоса, що працює в понад проектний термін експлуатації в лінії насосів енергоблока АЕС є край важливою задачею [3].

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз сучасних публікацій показує, що в експлуатації супровідні машини зазнають суттєвих циклічних перевантажень, а також відчувають дію агресивного середовища, що за певний час експлуатації

призводить до появи пошкоджень [4–6]. У роботі [7] показано ефективність використання елементів системи енергетичних блоків з подовженим ресурсом. Несвоєчасне їх виявлення може стати причиною виникнення аварійних ситуацій, екологічних катастроф, завдати суттєвих споживчих збитків, а також бути загрозою життю людини [8]. В статті [9] розглядається експлуатаційна надійність відцентрових насосів типу НК, наводиться розподіл відмов по вузлам насосного агрегату, відображено статистику відмов та встановлено найбільш вагомий вид зносу деталей насоса [10]. У дослідженні [11] розроблено методику діагностики технічного стану відцентрових насосів та на основі цих даних визначається можливість подовження його ресурсу, але аналіз проводиться без чисельного моделювання та без урахування випадковості розвитку пошкоджень. З аналізу останніх публікацій можна зробити висновок, що розвиток методів які направлені на подовження ресурсу відцентрових насосів та попередження виникнення аварійних ситуацій при виході їх з ладу за рахунок вчасного проведення їх технічного обслуговування та ремонту є актуальним питанням.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення залишкового ресурсу відцентрового насоса з урахуванням стоншення його стінок у часі та дії внутрішнього навантаження.

Виклад основного матеріалу

У даній роботі розглянуто питання оцінки залишкової міцності відцентрового насоса, що працює в понад проектний термін експлуатації в лінії насосів енергоблока АЕС. Наведено результати теоретичних досліджень його напружено-деформованого стану з урахуванням зміни геометрії корпусних деталей, яка спостерігалася по закінченні проектного терміну експлуатації. Оцінка статичної міцності проводилася для основного експлуатаційного режиму роботи насоса (при нормальних умовах експлуатації).

Відповідні дослідження проведено в рамках чисельного комп'ютерного моделювання на основі методу скінченних елементів з використанням сучасних програмних комплексів. Розроблено розрахункові тривимірні СЕ-моделі, які враховують фактичну геометрію деталей насоса і прогноз її можливої зміни на період продовженого ресурсу. Зміну геометрії конструкції враховано на основі екстраполяції даних товщини стінок корпусу, отриманих в процесі тривалого терміну експлуатації.

Насос, який розглядається відпрацював свій проектний ресурс. Експертна оцінка експлуатуючої організації його технічного стану показує, що має місце стоншення стінок корпусу в порівнянні з проектними значеннями. Під час аналізу швидкості ерозійно-корозійного зносу встановлено, що за час експлуатації товщини стінок корпусу, кришки і патрубків вони будуть стоншуватися лінійно в часі рівномірно по всьому корпусу на 1% за 100 годин роботи.

Досвід експлуатації показує, що середнє напрацювання для насоса становить 20 год / рік. Виходячи з експертних оцінок швидкості стоншення стінок і оцінки середнього напрацювання насоса в рік прогнозовано стоншення стінок корпусних деталей.

Розрахунки на міцність виконані за технологією тривимірного СЕ-моделювання. Для адекватної оцінки НДС до кожного патрубка додані фрагменти труб довжиною 1 м з пружно підвішеними кінцями.

При СЕ дискретизації використовувалися лінійні елементи гексагональної і тетраедральної форм (рис. 1). Трубопроводи мають менш густу сітку, ніж корпусні деталі, оскільки їх напружений стан не є об'єктом дослідження – вони моделюються лише для передачі адекватних граничних умов на патрубки насоса. Фактично ці елементи потрібні для нівелювання можливих крайових ефектів поблизу насоса. Для оцінки якості побудованої моделі була проведена серія розрахунків з СЕ-сітками різної густоти. Товщини стінок корпусних деталей задані відповідно до прогнозованих даних по стоншенню.

На геометричну модель була нанесена (СЕ) сітка. При цьому використовувався лінійний СЕ гексагональної і тетраедральної форм. Деталі насоса розбиті так, щоб основні конструктивні елементи мали хоча б по два елементи по товщині, усюди витримувалося співвідношення сторін СЕ з тим, щоб сітка не мала вироджених елементів. СЕ сітка, яка використовується для розрахунків, представлена на рис. 1.

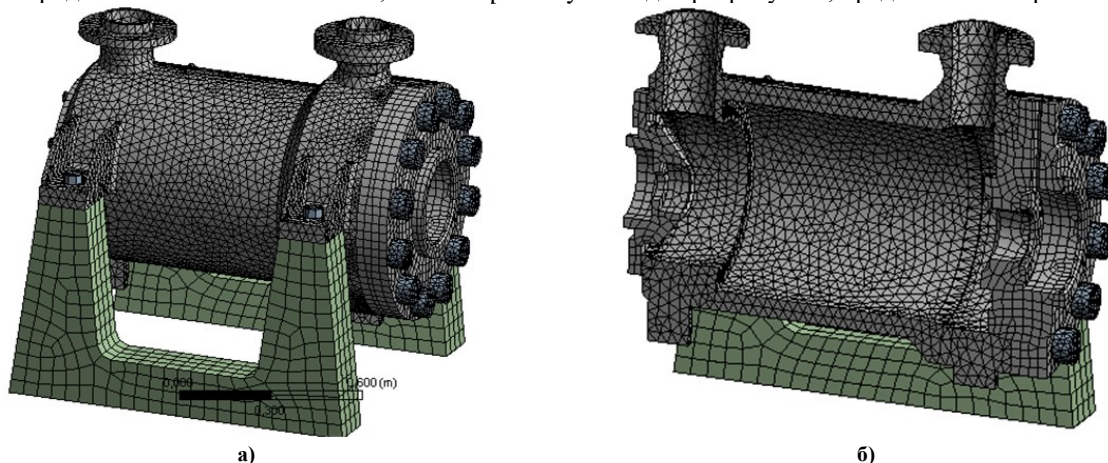


Рис. 1. СЕ сітка корпусу насоса: (а) (вид у розрізі горизонтальною площиною) (б)

Для вибору розмірів та кількості елементів для СЕ-сітки були проведені тестові розрахунки до допустимої похибки 5% за еквівалентними напруженнями.

Для проведення розрахунків використовувалися фізико-механічні характеристики матеріалів 12X18H10T, 40X, згідно з ПНАЕ Г 7-002-86. При цьому використовувались наступні граничні умови:

- жорстке закладення по опорних поверхнях лап насоса;
- обмеження можливості на радіальне стиснення по внутрішнім колам напірної і вхідної кришок;
- основа напірного і вхідного фланця в осьовому напрямку мали пружне спирання, яке моделює вплив відкинутих труб.
- об'ємна сила – сила тяжіння;
- на внутрішніх поверхнях задавався конвективний теплообмін вода – сталь (коефіцієнт тепловіддачі, 27900 Вт / м² °С);
- на зовнішніх поверхнях задавався конвективний теплообмін сталь – повітря (коефіцієнт тепловіддачі, 5 Вт / м² °С);
- температура навколишнього середовища приймалася 22 °С.

У розрахунках враховувалася наявність попереднього затягування різьбових з'єднань (рис. 2). Значення осьових зусиль для шпильок вхідної кришки і напірної становили 100 кН і 35 кН відповідно.

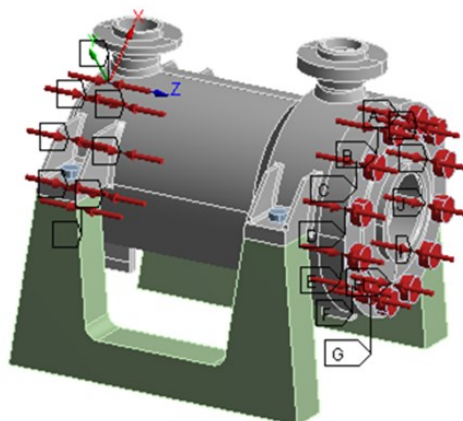


Рис. 2. Моделювання умов затягування різьбових з'єднань

Таким чином, на першому етапі вирішувалося завдання визначення попередньо напруженого стану, викликаного затягуванням шпильок. На рис. 3 представлено розподіл інтенсивності напружень (еквівалентні напруження за критерієм Мізеса), які формуються в насосі при цьому режимі навантаження.

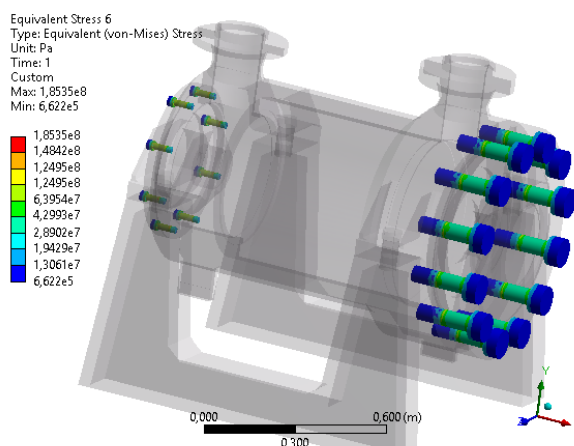


Рис. 3. Попереднє напружений стан шпильок, викликаний їх монтажною затягуванням

Згідно ПНАЕ Г 7-002-86 (п. 3.4), номінальні напруження, що допускається для елементів обладнання і трубопроводів, навантажених внутрішнім тиском, приймають мінімальним з наступних значень:

$$\sigma = \min\{R_m/2.6; R_{0.2}/1.5\}, \quad (1)$$

де R_m – межа міцності; $R_{0.2}$ – межа текучості.

Для болтових з'єднань

$$[\sigma]_w = R_{0.2}/1.5, \quad (2)$$

Аналізуючи попереднє напружений стан шпильок, затягування призвело до наявності стискаючих напружень в шпильках досить істотного рівня (рівень максимальних напружень формується під гайкою і на місці входу шпильки в тіло корпусу і становить 185 МПа, що менше допустимого значення 295 МПа).

Високий рівень напружень в місцях концентрації сформувався і на кришках насоса (рис. 3), при цьому отримані напруги (72 МПа) менше номінальних допустимих напружень (131 МПа).

Для оцінки залишкового ресурсу використовувались результати розрахунку НДС при тиску НУЕ (рис. 4).

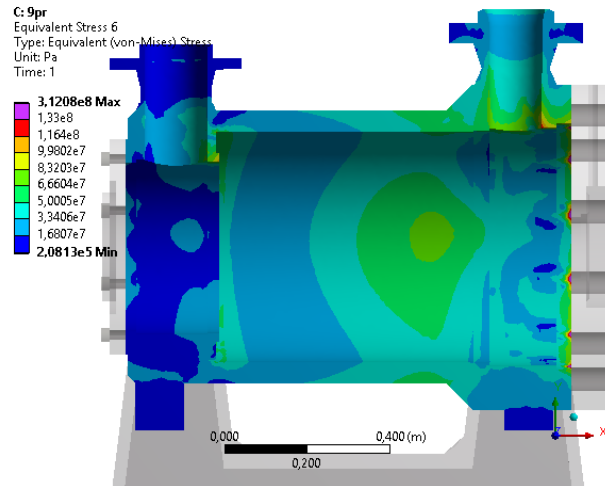


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень по Мізесу по корпусу насоса

Таким чином, в якості мінімальних напружень циклу використовуються значення еквівалентних напружень по Мізесу (88 МПа в корпусі, 83 МПа в напірній кришці).

У місцях зварних швів окремо перевірялася циклічна міцність, при цьому враховувалося зниження їх міцності шляхом збільшення еквівалентних амплітуд напружень шляхом їх поділу на коефіцієнт зниження міцності зварного шва. Даний коефіцієнт для сталі аустенітного класу при ручному зварюванні з наступним візуальним контролем відповідає 0,8 (найбільш консервативна оцінка) відповідно до рекомендацій в ПНАЕ. Таким чином, разом зварного шва по лапі мінімальні напруження циклу становлять $143 / 0.8 = 178$ МПа, а максимальні - $155 / 0.8 = 193$ МПа.

З даних про експлуатацію відцентрового насоса на електричній станції відомо, що після закінчення проектного строку роботи стінки корпусу були стоншені на 10% за рахунок ерозійно-корозійного зносу. При подальших розрахунках прогнозоване значення відсотку стоншення стінки корпусу вважався випадковою величиною, яка змінюється у часі.

Стоншення стінки насоса пропонується враховувати у часі у вигляді степеневої функції, яка пов'язує час експлуатації та відсоток стоншення $h(t)$:

$$h(t) = \bar{h} + k(t - \bar{t})^\alpha \quad (3)$$

де \bar{t}_0 – проектний термін експлуатації, що дорівнює 30 років, α та k – це показники кінетики збільшення стоншення. Процес стоншення стінки за рахунок корозійно-ерозійного зносу є випадковим, що може бути враховано, якщо показники рівняння кінетики її росту (3): α та k вважати випадковими величинами.

Параметр k здатен суттєво змінюватись, навіть за більш-менш однакових зовнішніх факторах. Параметр α в багатьох дослідженнях вважається сталою детермінованою величиною, що дорівнює 0,73. Із статистичних даних відомо, також, що розподіл значень із достатньою точністю можна вважати підпорядкованим лог-нормальному закону розподілення:

$$f(h, t) = \frac{1}{h(t)S(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(-\ln h - \mu(t))^2}{S^2(t)}\right] \quad (4)$$

де $S_j(t)$ та $\mu_j(t)$ – це параметри закону, які залежать відповідно до розміру дефекту у поточний час експлуатації та визначаються з коефіцієнту варіації та математичного очікування габаритних розмірів дефекту наступним чином:

$$\mu_j(t) = \ln\left(\frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)}}}\right), S_j^2(t) = \ln\left(1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)}\right) \quad (5)$$

$$m(t) = \langle \bar{h} + k(t - \bar{t})^\alpha \rangle = \bar{h} + \langle k \rangle (t - \bar{t})^\alpha \quad (6)$$

$$Var_h(t) = \langle (\bar{h} + k(t - \bar{t})^\alpha)^2 \rangle = Var(k)(t - \bar{t})^{2\alpha} \quad (7)$$

$$v_j = \frac{\sqrt{\text{Var}_{d_j}(t)}}{m_j(t)} = \frac{\sqrt{\text{Var}_{k_j}(t)}}{\langle k_j \rangle} = \text{const} \quad (8)$$

де $\langle \dots \rangle$ – оператор усереднення, $m_j(t)$ – математичне очікування, $\text{Var}(\dots)$ – дисперсія v_j – коефіцієнт варіації, який залежить від часу. На рис. 4 схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження $m_3(t)$ та можливий розкид її значень у часі.

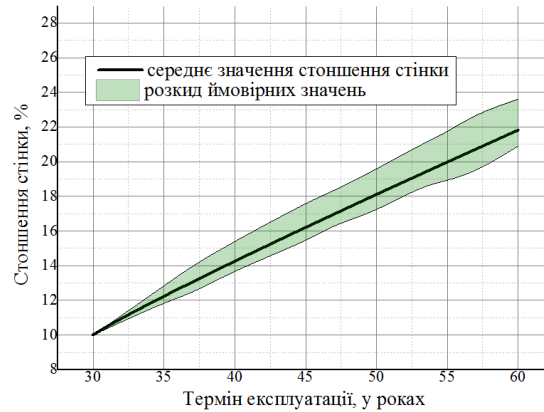


Рис. 5. Розподіл значень відсотків стоншення стінки корпусу насоса

Зміна пластичних деформацій в залежності від терміну експлуатації та стоншення корпусу насоса показано на рис. 6

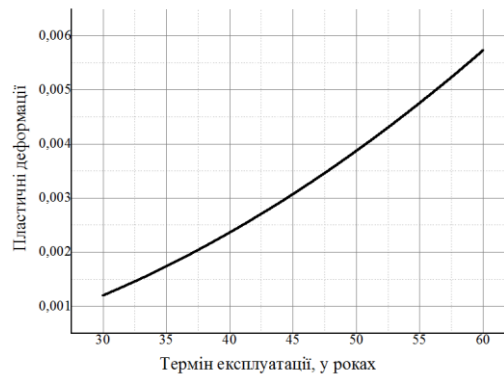


Рис. 6. Пластичні деформації у корпусі насоса

$$\varepsilon(h, t) = K_1 h(t)^2 + K_2 h(t) + K_3 \text{ для } 30 \leq t \leq 60 \quad (9)$$

Відповідно, до ймовірних значень відсотку стоншення стінки було досліджено статистичне НДС конструкції, на основі якого визначено параметр пошкоджуваності. Для цього використовується ступеневий закон кінетики накопичення пошкоджуваності у рамках концепції ефективних напружень Работнова-Качанова. З урахуванням процесів накопичення багато- або малоциклової втоми визначається параметр пошкоджуваності для кожного з прогнозованих випадків відповідно до виразу 10.

$$D = \begin{cases} 1 - [1 - (n + N_D)\delta_D(2s + 1)]^{\frac{1}{2s+1}}, dp > 0 \\ 1 - [1 - (n + N_D)\delta_M(m + 1)]^{\frac{1}{m+1}}, dp = 0 \end{cases} \quad (10)$$

де D – параметр пошкоджуваності, n – поточне значення циклу, N_D – значення циклу, при якому починається накопичення пошкоджуваності, δ_D – змінна, яка залежить від параметрів НДС конструкції при накопиченні малоциклової втоми, δ_M – змінна, яка залежить від параметрів НДС конструкції при накопиченні багатоциклової втоми, s, m – параметри матеріалу, які визначаються з кривої Велера, dp – значення пластичних деформацій [8]. З даних про експлуатацію відцентрових насосів на електричній станції відомо, що ці у рік кількість циклів дорівнює 1000. З урахуванням розробленої математичної моделі було отримано параметр пошкоджуваності при стоншенні стінки при прогнозі подальшої експлуатації на 15 років. (рис. 7).

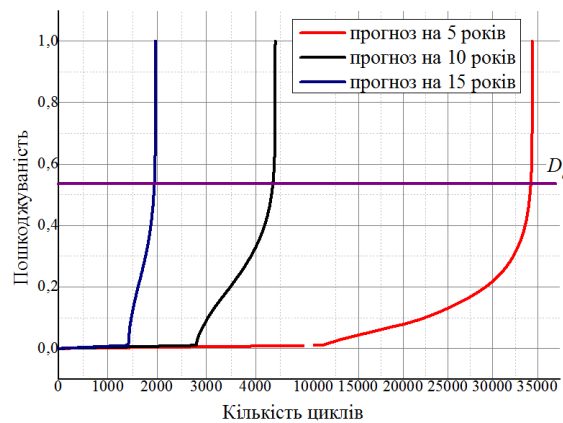


Рис. 7. Математичне очікування параметру пошкоджуваності при прогнозі на 5, 10 та 15 роботи понад проектний термін

З аналізу отриманих даних визначено, що при прогнозі при стоншення стінки через 5 років експлуатації кількість циклів до відмови дорівнює 30000 циклів, що еквівалентно терміну експлуатації у 30 роки, при прогнозі при стоншення стінки через 10 років експлуатації кількість циклів до відмови дорівнює – 4200, що еквівалентно 4 рокам, а при прогнозі при стоншення стінки через 15 років експлуатації кількість циклів до відмови дорівнює 1000 циклів (1 рік експлуатації). Тобто експлуатація насосу після такого рівня корозійно-ерозійного зносу небезпечна, та цей об'єкт слід знімати з роботи.

Таким чином були отримані ймовірнісні характеристики накопичення втомних пошкоджень в процесі експлуатації. Ці результати можна використати для оцінки ймовірнісних характеристик часу до відмови як випадкової величини.

При використанні отриманих статистичних даних параметру пошкоджуваності, визначено ймовірність безвідмовної роботи при прогнозуванні збільшеного терміну експлуатації на 5, 10 та 15 років.

За допомогою чисельної процедури ймовірність безвідмовної роботи визначалась як ймовірність того, що параметр D дорівнює значенню D_c (0.5 для матеріалу насоса). Результати розрахунків показані на рис. 8.

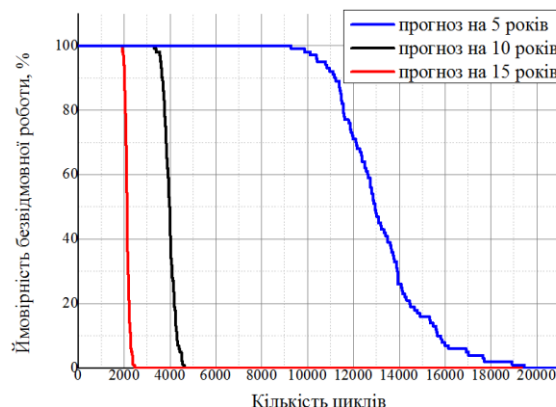


Рис. 8. Ймовірність безвідмовної роботи конструкції при прогнозі на 5, 10 та 15 роботи понад проектний термін

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отже, можна зробити висновок, що при подальшій експлуатації відцентрового насоса, після 15 років експлуатації його працездатність зменшиться у 15 разів, та подальше використання його у роботі буде небезпечне.

Література

1. Нечуйвітер М.М. Підвищення надійності експлуатації живильних насосів деаераційних установок паротурбінних блоків електростанцій / М.М. Нечуйвітер, І.Г. Шелепов // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – Vol. 15, № 1124. – P. 151–154.
2. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. Analysis of VVER-1000 main circulation pump condition in operation. Nucl. Energy Technol. Elsevier B.V., 2017. Vol. 3, № 1. P. 10–14.
3. Ларин А.А. Анализ прочности насоса с целью продления его ресурса / А.А. Ларин // Ядерна та радіаційна безпека. – 2018. – Vol. 79, № 3. – P. 30–35.
4. Noon A.A. Erosion wear on centrifugal pump casing due to slurry flow / A.A. Noon, M.H. Kim // Wear. Elsevier. – 2016. – Vol. 364–365. – P. 103–111.
5. Xing D. Finite element analysis of wear for centrifugal slurry pump / D. Xing, Z. Hai-lu, W. Xin-yong // Procedia Earth Planet. Sci. Elsevier B.V. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 1532–1538.

6. Tarodiya R., Gandhi B.K. Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps - A review. *Powder Technol. Elsevier B.V.* 2017. Vol. 305. P. 27–38.
7. Черноусенко О. Ю. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3) : монографія для науковців та докторів філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика / О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк, В. А. Пешко / КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 308 с.
8. Rämä T. et al. CFD analysis of the temperature field in emergency pump room in Loviisa NPP. *Nucl. Eng. Des. Elsevier B.V.* 2014. Vol. 279. P. 104–108.
9. Потопальська К. Є. Оцінка надійності та прогнозування ресурсу елементів трубопроводу з урахуванням процесів накопичення втоми та розвитку корозії / К. Є. Потопальська, О. О. Ларін // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – Р. 46 – 52.
10. Литовка О. Є. Аналіз експлуатаційної надійності відцентрових насосів та шляхи її підвищення / О. Є. Литовка // Модернізація та наукові дослідження: парадигма інноваційного розвитку суспільства і технологій : матеріали III міжнародної науково-практ. конф., 24–25 січня 2020 р. м. Київ. – С. 207–212.
11. Кирилів Я. Б. Розробка методики визначення технічного стану пожежного насоса в експлуатації за вібраційними показниками / Я. Б. Кирилів, І. Л. Ущачівський // Пожежна безпека. – ЛДУБЖ. – Том 27. – С. 64–69.

References

1. Nechuiviter M.M. Pidvyshchennia nadiinosti ekspluatatsii zhyvylnykh nasosiv deaeratsiinykh ustanovok paroturbinykh blokv elektrostantsii / M.M. Nechuiviter, I.H. Shelepov // Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia. – 2015. – Vol. 15, № 1124. – P. 151–154.
2. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. Analysis of VVER-1000 main circulation pump condition in operation. *Nucl. Energy Technol. Elsevier B.V.*, 2017. Vol. 3, № 1. P. 10–14.
3. Laryn A.A. Analiz prochnosti nasosa s tseliu prodlennia cho resursa / A.A. Laryn // Yaderna ta radiatsiina bezpeka. – 2018. – Vol. 79, № 3. – P. 30–35.
4. Noon A.A. Erosion wear on centrifugal pump casing due to slurry flow / A.A. Noon, M.H. Kim // *Wear. Elsevier.* – 2016. – Vol. 364–365. – P. 103–111.
5. Xing D. Finite element analysis of wear for centrifugal slurry pump / D. Xing, Z. Hai-lu, W. Xin-yong // *Procedia Earth Planet. Sci. Elsevier B.V.* – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 1532–1538.
6. Tarodiya R., Gandhi B.K. Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps - A review. *Powder Technol. Elsevier B.V.* 2017. Vol. 305. P. 27–38.
7. Chernousenko O. Yu. Otsinka zalyshkovoho resursu ta podovzhennia ekspluatatsii parovykh turbin velykoi potuzhnosti (chastyna 3) : monohrafiia dlia naukovtsiv ta doktoriv filosofii za spetsialnistiu 144 Teploenerhetyka / O. Yu. Chernousenko, D. V. Ryndiuk, V. A. Peshko / KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 308 s.
8. Rämä T. et al. CFD analysis of the temperature field in emergency pump room in Loviisa NPP. *Nucl. Eng. Des. Elsevier B.V.* 2014. Vol. 279. P. 104–108.
9. Potopalska K. Ye. Otsinka nadiinosti ta prohnozuvannia resursu elementiv truboprovodu z urakhuvanniam protsesiv nakopychennia vtomy ta rozvytku korozii / K. Ye. Potopalska, O. O. Larin // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 1. – P. 46 – 52.
10. Lytovka O. Ye. Analiz ekspluatatsiinoi nadiinosti vidtsentroyvkh nasosiv ta shliakhy yii pidvyshchennia / O. Ye. Lytovka // Modernizatsiia ta naukovy doslidzhennia: paradyhma innovatsiinoho rozvytku suspilstva i tekhnolohii : materialy III mizhnarodnoi naukovoprakt. konf., 24–25 sichnia 2020 r. m. Kyiv. – S. 207–212.
11. Kyryliv Ya. B. Rozrobka metodyky vyznachennia tekhnichnoho stanu pozhezhnoho nasosa v ekspluatatsii za vibratsiinyymi pokaznykamy / Ya. B. Kyryliv, I. L. Ushchapivskyi // Pozhezhna bezpeka. – LDUBZh. – Tom 27. – S. 64–69.

КОВТУН І. І.

<https://orcid.org/0000-0002-1430-6479>

ПЕТРАЩУК С. А.

<https://orcid.org/0000-0003-2043-1409>

БОЙКО Ю. М.

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ НА ВИНИКНЕННЯ ТА ПЕРЕДАЧУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ

Представленим в даній роботі науковим результатом є подальший розвиток застосування теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів для оцінки міцності електронних компонентів, що мають форму тіл обертання та оточуючого шару компаунду при довільній формі заливки останнього в умовах термоудару. В межах осесиметричної задачі проведена оцінка напружено-деформованого стану системи електронний компонент – компаунд при перепаді температур, завдяки чому виявлено закономірність виникнення максимальних загальних радіальних, окружних та осьових напружень в залежності від їх радіального розподілу та режиму температурного навантаження. Здійснено розрахунок напружень в резисторі С2-29В герметизованому компаундом марки ЕЗК-25 в складі гермомодуля при сталому перепаді температур. Запропоновано експериментальний спосіб визначення граничних напружень в електронних компонентах герметизованих компаундом. Представлені ефективні технологічні методи захисту електронних компонентів герметизованих компаундом.

Ключові слова: герметизований електронний модуль, електронний компонент, компаунд, міцність, напружено-деформований стан

Igor KOVTUN, Svitlana PETRASHCHUK, Juliy BOIKO

Khmelnitskyi National University

INFLUENCE OF THE SEALING ON APPEARANCE AND TRANSMISSION OF TEMPERATURE DEFORMATIONS IN ELECTRONIC MODULES

The scientific result presented in this paper consists in development of the Lamé-Gadolin theory about interaction of joint thick-walled cylinders application to estimate strength of electronic components represented by bodies of revolution and surrounding layer of compound sealed by an arbitrary shape subjected to thermal impacts in the temperature range from +70 to -60 deg C. The difference in the coefficients of linear thermal expansion and other physical and mechanical characteristics of compound and electronic components under the temperature changes produces a contact pressure on their contact area causing thermal strain and stress in materials of both bodies in the sealed structure. Within the framework of the axisymmetric problem, the stress-strain condition of the electronic component-compound system has been assessed in condition of thermal impact, due to which the pattern of the maximum total radial, circumferential and axial stresses has been revealed depending on their radial distribution and the temperature load mode. The stress estimation in the S2-29V resistor sealed with the EZK-25 compound inside the sealed electronic package has been performed at the constant temperature drop. The experimental method is proposed for determining the ultimate stresses in electronic components sealed with compound under stress and strain condition identical to the operational one. Experimental measurement of circumferential and axial strains was carried out by using method of extensometry. Thermal impacts were reproduced in the thermostat and the climatic chamber. Technological methods for protection of electronic components in the structures of electronic packages sealed with compound has been proposed by embedding elastic and dissipative joints between electronic components and a sealant, and the effectiveness of their application is experimentally evaluated based on determination of the damping coefficient.

Keywords: sealed electronic package, electronic component, compound, strength, stress and strain condition

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Електронні модулі із загальною герметизацією експлуатуються на різноманітних об'єктах техніки: літаках, ракетах, судах, радіолокаційних станціях, локомотивах, де їм доводиться працювати в несприятливих умовах вібрацій, ударів, різких перепадів температури, вологості та тиску. Загальна герметизація (компаундом) забезпечує надійний захист від кліматичних впливів, підвищення стійкості виробів до дії вібрацій, проте на стадії виробництва при технологічному тренуванні термоударами (коли вироби з температури +70°C переносяться в температуру -60°C з годинною витримкою при кожній температурі), а також на етапах зберігання і експлуатації при коливаннях температури, внаслідок різниці в значеннях фізико-механічних характеристик, виникає взаємодія герметика із його включеннями, тобто з електронними компонентами та іншими елементами конструкції, що призводить до виникнення руйнівних механічних напружень. При розтріскуванні компаунду порушується герметизація виробу з наступним виходом його з ладу, при руйнуванні або деформації електронних компонентів настає обрив електричного кола, або відхилення електричних параметрів. Складність таких дефектів полягає у низькій ремонтпридатності герметизованих модулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні застосування розрахунково-експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану [1–3] та забезпечення міцності деталей, вузлів та блоків електронної техніки [4, 5]

суттєво ускладнюється через такі причини як відсутність загальноприйнятої термінології, методик оцінки міцності та норм міцності, за якими повинно вестись проектування, розрахунки, випробування і впровадження в серійне виробництво та експлуатацію виробів електронної техніки, на противагу багатьом іншим галузям техніки, та складність натурних конструкцій, які представляють собою багатозв'язкові механічні системи і спроби розрахунку їх напружено-деформованого стану часто приводять до неточності рішень і компрометують найсучасніші методи розрахунку особливо в умовах нестабільності фізико-механічних характеристик використовуваних матеріалів і технології виробництва та сучасної тенденції до зниження ваги і отримання більшої щільності монтажу в малих габаритах виробів електронної техніки [7–9].

Постановка завдання

Завданням представленого дослідження є оцінка напружено-деформованого стану конструкції електронних модулів герметизованих компаундом при термоударах та розробка технологічних методів захисту електронних компонентів у герметизованих конструкціях. Об'єктами дослідження є електронні компоненти, які герметизовані компаундом і мають форму тіл обертання, такі як резистори, конденсатори, діоди, гермо-виводи і т.д.

Оцінка напружено-деформованого стану системи електронний компонент – компаунд при перепаді температур

Типовий процес герметизації електронних компонентів відбувається шляхом заливки полімерним матеріалом. До заливки модуль і компаунд розігріваються до температури полімеризації, розширюючись при цьому незалежно один від одного. Після заливки компаундом виріб поміщають в термостат і витримують до закінчення процесу полімеризації, в ході якого через хімічну усадку компаунда вже виникають незначні за величиною контактний тиск і напруження. По завершенні процесу полімеризації готові вироби охолоджують до нормальної температури. Тепер конструкція являє собою заполімеризований об'єм компаунда, який може розглядатися як єдине тіло із численними різнорідними включеннями.

Внаслідок відмінності коефіцієнтів лінійного температурного розширення і інших фізико-механічних характеристик компаунда і електронних компонентів при зміні температури на їх межі виникає контактний тиск, який зумовлює наявність напруження в матеріалах конструкцій.

Представленим в даній роботі науковим результатом є подальший розвиток застосування теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів для оцінки міцності електронних компонентів, що мають форму тіл обертання та оточуючого шару компаунду при довільній формі заливки останнього.

Розрахункова схема представлена на рис. 1, а зведена до осесиметричної задачі взаємодії двох циліндричних тіл, на межі яких виникає контактний тиск P в наслідок різниці коефіцієнтів температурного лінійного розширення та інших фізико-механічних характеристик [10].

Якщо товщина стінки циліндричного тіла електронного компонента більше однієї десятої середнього радіуса, то з прийнятною для практики точністю його можна розглядати як товстостінний циліндр [11], навантажений по зовнішній поверхні контактним тиском P , а по внутрішній – тиском навколишнього середовища P_1 . А виділений шар компаунда як товстостінний циліндр, навантажений по внутрішній поверхні контактним тиском P , а по зовнішній тиском P_2 , рівним тиску навколишнього середовища.

Напружено-деформований стан представлено на рис. 1, б для нескінченно малого елемента $abcd$ вирізаного і циліндричного тіла, яким є електронний компонент або оточуючий його шар компаунду. На схемі σ_r – нормальне напруження на внутрішній циліндричній поверхні об'єму радіусом r (радіальні напруження); $\sigma_r + d\sigma_r$ – нормальне напруження на зовнішній поверхні радіусом $r + dr$; σ_t – нормальні напруження на плоских бічних гранях (окружні напруження); σ_z – нормальні напруження на торцевих поверхнях (осьові напруження). Показаний напрям напружень будемо вважати додатнім і відповідним розтягуванню елемента.

Внаслідок осьової симетрії циліндра і навантаження елемент перекошуватись не буде, і дотичні напруження по його гранях будуть відсутні. Тому нормальні напруження σ_r , σ_t та σ_z будуть головними напруженнями.

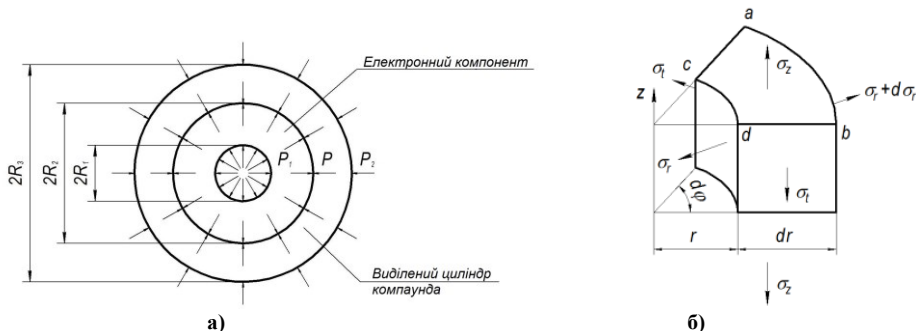


Рис. 1. Розрахункова схема: а) осесиметричної задачі взаємодії двох циліндричних тіл; б) напружено-деформованого стану елементарного об'єму

Відповідно до узагальненого закону Гука деформації елементарного об'єму представляють собою суму деформацій викликаних тиском і температурними розширеннями:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_z - \mu\sigma_t) + \alpha \Delta\tau; \quad \varepsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \mu\sigma_z - \mu\sigma_r) + \alpha \Delta\tau; \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_r - \mu\sigma_t) + \alpha \Delta\tau, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення, $\Delta\tau$ – зміна температури залежна від радіуса r та від часу t :

$$\Delta\tau(r, t) = \tau(r, t) - \tau_0, \quad (2)$$

де $\tau(r, t)$ – розподіл температури по радіусу циліндра, τ_0 – початкова температура тіла, t – час.

Рішенням рівнянь (1) вирази для напружень набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}[(1-\mu)\varepsilon_r + \mu\varepsilon_t + \mu\varepsilon_z - (1+\mu)\alpha \Delta\tau] \\ \sigma_t &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}[(1-\mu)\varepsilon_t + \mu\varepsilon_r + \mu\varepsilon_z - (1+\mu)\alpha \Delta\tau] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}[(1-\mu)\varepsilon_z + \mu\varepsilon_r + \mu\varepsilon_t - (1+\mu)\alpha \Delta\tau] \end{aligned} \quad (3)$$

Отримані в [12] вирази температурних напружень представляють собою суму напружень, які виникають від нерівномірності радіального розподілу температури та напружень, які виникають від дії контактного тиску:

$$\sigma(P, \tau, r) = \sigma(\tau, r) + \sigma(P, r). \quad (4)$$

Наступні вирази (5–13) представлені з врахуванням граничних умов при $i = 1$: $(\sigma_{R_i}) = -P_i$, $(\sigma_{R_{i+1}}) = -P$ та при $i = 2$: $(\sigma_{R_i}) = -P$, $(\sigma_{R_{i+1}}) = -P_{i+1}$.

Напруження від нерівномірності радіального розподілу температури:

$$\sigma_r(\tau, r) = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[-\frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r \alpha_i \Delta\tau_i r dr + \frac{r^2 - R_i^2}{r^2 (R_{i+1}^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \alpha_i \Delta\tau_i r dr \right], \quad (5)$$

$$\sigma_t(\tau, r) = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[\frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r \alpha_i \Delta\tau_i r dr + \frac{r^2 - R_i^2}{r^2 (R_{i+1}^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \alpha_i \Delta\tau_i r dr - \alpha_i \Delta\tau_i \right], \quad (6)$$

$$\sigma_z(\tau, r) = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[\frac{2}{R_{i+1}^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \alpha_i \Delta\tau_i r dr - \alpha_i \Delta\tau_i \right]. \quad (7)$$

Напруження від дії контактного тиску (8–13) представлені при $P_i = 0$ внаслідок малості цих значень в порівнянні із контактним тиском P (табл. 1).

Аналіз математичних моделей (5–13) показав [13], що при сталому перепаді температур $\Delta\tau$ (це явище має місце при повному охолодженні або нагріванні системи електронний компонент – компаунд) і в електронному компоненті, і в оточуючому шарі компаунду значення загальних напружень (8–13) досягають максимальних значень, що також підтверджено в результаті експериментального дослідження.

Всі раніше наведені формули для визначення напружень складових нероз'єднаного з'єднання кераміка – компаунд є функціями контактного тиску P . Для визначення контактний тиску P розглянуто умову сумісності деформацій внутрішньої поверхні компаундного циліндра і зовнішньої циліндричної поверхні кераміки резистора: $U_{el/r=R_2} = U_{комп/r=R_2}$.

Враховуючи значення переміщень матеріалів компаунда і електронного компонента на межі із контакту при $P_i = 0$ та $\Delta\tau = \text{const}$ контактний тиск отримує вираз (14) [10]:

Таблиця 1

Формули для визначення напружень і контактний тиск при сталому перепаді температур

Напруження	В електронному компоненті	У компаундному циліндрі
Радіальні	$\sigma_{r_1}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right), \quad (8)$	$\sigma_{r_2}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 1 \right), \quad (11)$
Окружні	$\sigma_{t_1}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1 \right), \quad (9)$	$\sigma_{t_2}(P, r) = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right), \quad (12)$
Осьові	$\sigma_{z_1}(P) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (10)$	$\sigma_{z_2}(P) = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2}, \quad (13)$
Контактний тиск	$P = \frac{[(1+\mu_2)\alpha_2 - (1+\mu_1)\alpha_1]\Delta\tau}{\frac{[(1+\mu_1)R_1^2 + (1-\mu_1)R_2^2]}{E_1(R_3^2 - R_1^2)} + \frac{[(1+\mu_2)R_3^2 + (1-\mu_2)R_2^2]}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}}. \quad (14)$	

Розрахунок напружень в резисторі С2-29В герметизованому компаундом марки ЕЗК-25 в складі гермомодуля при сталому перепаді температур

Аналітичний розрахунок головних напружень в резисторі та компаунді у складі гермомодуля виконувався за формулами (8–13).

Розрахунок був проведений при рівномірному шарі компаунда. Радіуси сполучених циліндричних тіл склали: $R_1 = 0,2$ мм; $R_2 = 0,75$ мм; $R_3 = 10$ мм.

Перепад температур, який відповідає зміні температури всього гермомодуля від $+70^\circ\text{C}$ (температура полімеризації) до -60°C (мінімально допустима температура випробувань в заводських умовах і в експлуатації) склав $\Delta\tau = 130^\circ\text{C}$.

Для розрахунку використовувалися фізико-механічні характеристики отримані в [14]. Розрахунок загальних радіальних, окружних та осьових напружень в резисторі та компаунді при сталому перепаді температур представлено у вигляді епюр їх радіального розподілу (рис. 2).

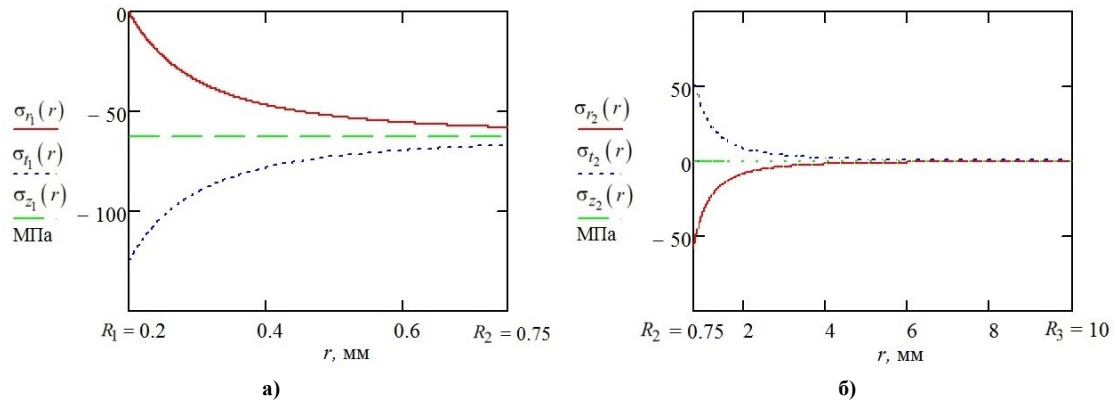


Рис. 2. Епюри радіального розподілу загальних напружень резистора (а) та компаунда (б) при сталому перепаді температур

Аналіз функцій епюр радіального розподілу загальних радіальних та окружних напружень показав, що в обох тілах радіальні напруження досягають максимальних значень на межі їх контакту, а окружні – на внутрішній поверхні кожного циліндру та при сталому перепаді температур.

В електронному компоненті виникають напруження стиску, при $R_1 \leq r \leq R_2$: $\sigma_{r1}(R_1) = 0, \sigma_{r1}(R_2) = \max, \sigma_{t1}(R_1) = \max, \sigma_{t1}(R_2) = \min$.

В компаунді радіальні напруження знаходяться в зоні стиску, а окружні – в зоні розтягу, при $R_2 \leq r \leq R_3$: $\sigma_{r2}(R_2) = \max, \sigma_{r2}(R_3) = \min, \sigma_{t2}(R_2) = \max, \sigma_{t2}(R_3) = \min$.

Осьові напруження σ_z за своїм значенням знаходяться між радіальними та тангенціальними і від радіусу r не залежать.

Оцінка міцності системи електронний компонент – компаунд із використанням осесиметричної розрахункової схеми (рис. 1) потребує вибору зовнішнього радіусу шару компаунду виділеного навколо заданого електронного компоненту, від якого, очевидно, залежить значення контактного тиску (14) на границі контакту та загальних напружень (8–10) в електронному компоненті. Такі залежності були отримані для найбільших за абсолютним значенням радіальних $\sigma_{r1}(R_3, r = R_2)$ (на зовнішній поверхні), окружних $\sigma_{t1}(R_3, r = R_1)$ (на внутрішній поверхні) та осьових напружень σ_{z1} (рис. 3).

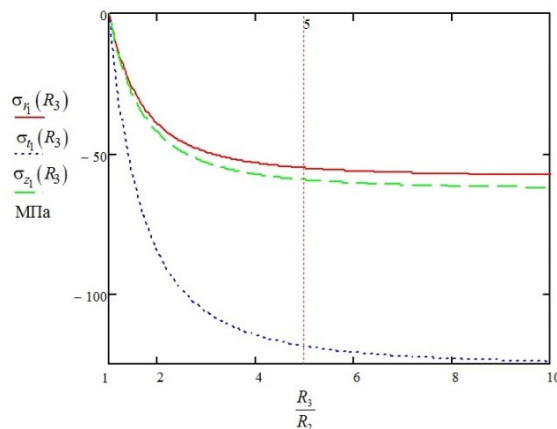


Рис. 3. Залежність найбільших за абсолютним значенням радіальних, окружних та осьових напружень в електронному компоненті від зовнішнього радіусу шару компаунду

З представлених графіків видно, що відповідно до отриманих функцій загальні напруження змінюються за гіперболічним законом і з ростом аргументу, в якості якого взята відносна величина R_3/R_2 , значення функцій наближаються до певних максимальних значень. В такому випадку можна визначити таке максимально допустиме значення аргументу – співвідношення зовнішніх радіусів компаундного циліндра і електронного компоненту, при подальшому збільшенні якого відносний приріст функцій $\Delta\sigma$ буде несуттєвим. Наприклад, при $[R_3/R_2] = 5$:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{r,t,z}[R_3/R_2] - \lim_{R_3/R_2 \rightarrow \infty} \sigma_{r,t,z}(R_3/R_2)}{\lim_{R_3/R_2 \rightarrow \infty} \sigma_{r,t,z}(R_3/R_2)} = -5,7\%$$

В таких випадках, задовольняючись 5-6% точністю розрахунків, компаундний циліндр можна розглядати як такий, що має нескінченно велику товщину стінки не залежно від форми його зовнішнього контуру. Таким чином, при зазначених співвідношеннях товщини шару компаунда і радіусу електронного компоненту можна обмежитися розглядом осесиметричної задачі, і збільшення тиску від компаунда, розташованого за зоною виділеного циліндра, буде несуттєвим у порівнянні з максимальним, знайденим при вирішенні осесиметричної задачі, і може не враховуватися в інженерних розрахунках.

Експериментальне визначення напружень в електронних компонентах герметизованих компаундом

Експериментальне визначення напружень проводилося для резисторів С2-29В у складі модулів герметизованих компаундом ЕЗК-25 при термоударах від +70°C до -60°C.

Поверхню резисторів препарували малобазними дротяними одно-нитковими тензорезисторами МПТ-1-100 для вимірювання окружних та осьових деформацій, які виникають в їх керамічних трубках.

Препаровані компоненти герметизували в складі гермомодуля експлуатаційним компаундом ЕЗК-25 на основі епоксидної смоли ЕД-20. В процесі термоудару здійснювалася безперервна реєстрація деформацій. В експерименті брало участь 5 гермомодулів, кожен із яких містив 5 резисторів. Випробування кожного гермомодуля проводили при термоциклюванні від температури +70°C до -60°C в п'яти циклах для цього гермомодуля поміщався в термостат СС-200 з температурою +70°C, а потім в кліматичну камеру Файтрон 3526/51 з температурою -60°C. Час витримки $t = 30$ хв при кожній температурі було отримано з розрахунку температурного розподілу в об'ємі виробу [12].

Для визначення деформацій резисторів тільки від дії компаунда від отриманих показань тензорезисторів в герметизованих модулях віднімали показання тензорезисторів в гермомодулях до герметизації при однакових значеннях температур.

В ході експериментів було встановлено, що максимальні значення загальних напружень відповідають моменту повного остигання гермомодуля, тобто при усталеному перепаді температур.

В табл. 2 представлено значення загальних окружних та осьових напружень отримані в результаті експериментального та аналітичного дослідження. Порівняння розрахункових та експериментальних значень показало їх незначну розбіжність до 13 %.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові значення загальних окружних та осьових напружень на поверхні резисторів С2-29В герметизованих компаундом ЕЗК-25 при термоударі від +70 до -60°C

Загальні напруження		
Радіальні σ_{rl} , МПа	Окружні σ_{tl} , МПа	Осьові σ_{zl} , МПа
Експериментальні значення		
–	-60,36	-55,25
Математичне моделювання		
-57,95	-66,83	-62,39
Відносне відхилення, %		
–	10,72	12,92

Таким чином було експериментально підтверджено висновок зроблений на основі аналітичного аналізу, про те, що максимальні значення загальних напружень в системі електронний компонент – компаунд при термоударах виникають при усталеному перепаді температур, що дозволяє використовувати в інженерних розрахунках для оцінювання міцності системи електронний компонент – компаунд формули для розрахунку загальних напружень при усталеному перепаді температур із достатньою точністю.

Оцінка міцності системи електронний компонент – компаунд

Електронні компоненти, заполімеризовані компаундом, і сам компаунд знаходяться в складному об'ємному напружено-деформованому стані, в якому всі три головні напруження не дорівнюють нулю. В таких випадках як вказано в [11] небезпечний стан одного і того ж матеріала може мати місце при різних граничних значеннях головних напружень залежно від співвідношень між ними, зокрема для електронного компонента $\sigma_{r1} > \sigma_{z1} > \sigma_{t1}$, а для компаунда $\sigma_{r2} > \sigma_{z2} > \sigma_{t2}$. Але вважається, що експериментальне встановлення граничних значення головних напружень виявляється дуже складною задачею як через труднощі постановки дослідів, так і через великий об'єм випробувань.

Використання теорій міцності теж не завжди правильно відображає реальний напружений стан об'єктів. Величина допустимого напруження носить умовний характер, так як не відображає характеру передбачуваного руйнування, режиму навантаження та інших факторів, що впливають на надійність.

В представленій роботі була здійснена спроба експериментального визначення граничних (руйнівних) напружень в умовах напружено-деформованого стану ідентичного до експлуатаційного. В якості таких напружень було обрано окружні напруження електронного компонента на межі контакту двох тіл, оскільки, як було показано в результаті математичного моделювання (9) та експериментального дослідження, серед інших напружень, саме вони є найбільшими за абсолютними значеннями і їх вимірювання не викликає труднощів.

Експериментальне визначення граничних окружних напружень здійснювалося способом аналогічним до описаного раніше, за винятком заливки «жорстким» (без пластифікатора і наповнювача) компаундом на основі ЕЗК-25, в якому зберігався подібний експлуатаційному об'ємний напружено-деформований стан, але із більшими значеннями. 5 герметизованих модулів послідовно з'єднували в електричне коло, яке піддавали термоударам із одночасною реєстрацією тензорезисторів і електричних параметрів кола. При обриві кола або відхиленні електричного параметра (опору) за допустимі межі ($\pm 10\%$) в жорсткому компаунді фіксували руйнівне напруження σ_b . Потім модуль із компонентом, який вийшов ладу виключали з електричного кола і продовжували експеримент.

При появі мерехтливих дефектів виміряні в жорсткому компаунді напруження брали за руйнівні, оскільки цей дефект є рівнозначним за своїми наслідками руйнуванню компонента і нерідко зустрічається в умовах експлуатації.

Отримані значення граничних окружних напружень виявилися в діапазоні від -58,74 до -107,66 МПа. Як показали результати попереднього дослідження максимальні експлуатаційні окружні напруження (табл. 2) можуть перевищувати ці граничні значення і приводити до руйнування і виходу з ладу електронних модулів, що вимагає розробки способів зниження експлуатаційних напружень та забезпечення міцності системи електронний компонент – компаунд.

Отримані результати розробки ефективних технологічних методів захисту електронних компонентів

Одним із найбільш ефективних методів зниження напружень в герметизованих системах, які виникають в результаті взаємодії електронного компонента та герметика, є створення або модифікація пружно-дисипативних зв'язків між ними.

Введення таких додаткових зв'язків в механічну систему електронний компонент – герметик було запропоновано застосуванням ряду технологічних засобів.

Ефективність застосування додаткових пружно-дисипативних зв'язків оцінювалася коефіцієнтом демпфірування рівного відношенню деформацій (напружень) електронного компонента виміряних в герметизованому модулі без та із застосуванням пружно-дисипативного зв'язку відповідно.

Для експериментального оцінювання коефіцієнту демпфірування кожного з видів захисних засобів використовувався окремий герметизований модуль, який містив по п'ять резисторів С2-29В. Резистори гермомодулів препарували малобазними тензодатчиками типу МПТ як описано раніше. Для визначення деформацій резисторів тільки від дії компаунда та захисного засобу від отриманих показань тензорезисторів в герметизованих модулях віднімали показання тензорезисторів в гермомодулях до герметизації при крайніх значеннях температур термоудару. Герметизація модулів відбувалася компаундом типу ЕЗК-25. При термоударах герметизовані модулі спочатку перебували в термостаті з температурою $+70^{\circ}\text{C}$ і далі в кліматичній камері з температурою -60°C з витримкою при кожній температурі не менше 30 хв.

Спочатку дослідженню підлягали демпфірувальні захисні покриття: кислотний однокомпонентний силіконовий герметик КЛТ-30 і нейтральний однокомпонентний силіконовий герметик ВГО-1, які використовуються для герметизації обладнання, пристроїв, резисторів, що працюють в умовах постійної вібрації, і не викликають корозії алюмінієвих сплавів, анодованих і срібних покриттів, вуглецевої сталі в діапазоні температур від -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$, та силіконовий герметик Висксинт У-2-28, який застосовується в пристроях, що використовуються в авіації, в космічних умовах, а також в електротехнічній і радіопромисловості.

Отримана ефективність використання вказаних видів покриття (табл. 3) досягалась не тільки демпфірувальними властивостями, але й усуненням безпосереднього зв'язку між електронними компонентами та герметиком завдяки їх антиадгезійним властивостям.

Проте більшу ефективність показали засоби запропоновані в наступному етапі розробки, в якому в якості пружно-дисипативних зв'язків використовувалися кембрики виготовлені з поліетилену та поліхлорвінілових термоусадних трубок. Поліетиленові кембрики та термоусадні трубки відповідного діаметру попередньо розрізані по твірній та використані для захисту електронних компонентів у складі модуля перед герметизацією.

Як видно із табл. 3 кембрики та трубки мають найбільший коефіцієнт демпфірування, крім того у ряді випадків такі засоби є більш технологічними в порівнянні із покриттям і більш дешевими, хоча вони і не завжди застосовувані у виробництві, як, наприклад, при захисті компонентів прямокутної форми.

Слід зазначити, що оцінка напружено-деформованого стану системи електронний компонент – компаунд, запропонована в цьому підрозділі, розроблена для електронних компонентів, які мають форму тіл

обертання. Вибір таких об'єктів дослідження викликано тим, що саме така форма піддається найбільшому навантаженню зі сторони герметика, який оточує їх з усіх сторін та створює складний об'ємний напружено-деформований стан для ЕК та герметика.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта демпфірування пружно-дисипативних зв'язків

Вид пружно-дисипативного зв'язку	Коефіцієнти демпфірування
KLT-30	1,91
ВГО-1	1,96
У-2-28	2,05
Кембрики із поліетилену	3,66
Поліхлорвінілові термоусадні трубки	3,42

На відміну від тіл обертання багаточисельні ЕК прямокутної форми, зокрема ЕК поверхневого монтажу, мають обмежену площу контакту із герметиком і за рахунок цього піддаються меншому навантаженню, яке в основному приходить на одну найбільшу поверхню компонентів. Разом із тим прямокутна форма не позбавлена своїх недоліків, до яких можна віднести гострі ребра та кути, які виступають концентраторами напружень і суттєво знижують міцність герметизованих конструкцій. Одним із способів зниження таких концентраторів може бути згладження або округлення ребер компонентів, що буде також наближувати їх форму до форми тіл обертання і зробить можливим використання запропонованої математичної моделі для розрахунку напружень та оцінки їх міцності, але таке завдання не входило в рамки представлених досліджень.

Ще одним із можливих методів зниження напружено-деформованого стану системи електронний компонент – герметик може бути зменшення перепаду температур Δt , який виникає в наслідок різниці між температурою полімеризації в процесі герметизації та експлуатаційною температурою. Як показано в (14) величина контактного тиску, а значить і величина загальних напружень (8–13) є прямо пропорційною до Δt . Таким чином зменшення температури полімеризації дозволить зменшити стан попередньої напруженості герметизованих модулів в процесі виробництва та в подальшому експлуатаційний напружено-деформований стан.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Застосуванням теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів для оцінки міцності електронних компонентів, що мають форму тіл обертання та оточуючого шару компаунду при довільній формі заливки останнього отримані функції радіального розподілу загальних радіальних та тангенціальних напружень, які виявили, що в обох тілах радіальні напруження досягають максимальних значень на межі їх контакту, а окружні – на внутрішній поверхні кожного циліндру та при сталому перепаді температур.

Встановлено, що при співвідношенні товщини виділеного шару компаунда до радіусу електронного компонента, яке складає 5:1, можна обмежитися розглядом осесиметричної задачі, і збільшення тиску від компаунда, розташованого за зоною виділеного циліндра, буде несуттєвим і може не враховуватися в інженерних розрахунках.

Запропоновано експериментальний спосіб визначення граничних напружень, відповідно до якого граничні (руйнівні) окружні напруження електронних компонентів визначаються в такому ж об'ємному напружено-деформованому стані, що і при експлуатації, але із більшими значеннями завдяки використанню «жорсткого» (без пластифікатора і наповнювача) компаунду.

Запропоновані технологічні методи захисту електронних компонентів у герметизованих компаундом конструкціях електронної техніки за рахунок створення пружно-дисипативних зв'язків між електронними компонентами та герметиком і експериментально оцінена ефективність їх застосування на основі визначення коефіцієнту демпфірування рівного відношенню деформацій (напружень) електронного компонента виміряних в герметизованому модулі без та із застосуванням пружно-дисипативного зв'язку відповідно. Встановлено, що найбільші коефіцієнти демпфірування мають поліетиленові кембрики та поліхлорвінілові термоусадні трубки відповідного діаметру попередньо розрізані по твірній та використані для захисту електронних компонентів у складі модуля перед герметизацією.

Література

1. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
2. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.
3. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York : McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.
4. ДСТУ 2634–94. Вироби електронної техніки. Методи оцінювання відповідності вимогам до надійності. – [Чинний від 1995-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 1995. – 4 с.

5. ДСТУ 7655:2014. Вироби електронної техніки. Загальні вимоги щодо надійності та методи випробування. – [На заміну ГОСТ 25359-82 ; чинний від 2015-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 9 с.
6. ДСТУ 8216:2015. Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 11 с.
7. Прогнозирование надёжности узлов и блоков радиотехнических устройств космического назначения на основе моделирования напряжённо-деформируемых состояний : монография / С. Б. Сунцов, В. П. Алексеев, В. М. Карабан, С. В. Пономарёв. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 114 с.
8. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы / Е. Н. Талицкий. – Владимир : Владим. гос. ун-т., 2001. – 256 с.
9. Singh T. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages / T. Singh., P. Viswanadham. – Boston : Chapman & Hall, MA: Springer, 1998. – P. 363.
10. Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment / V. Royzman, S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Lokoshchenko // Journal of Vibroengineering. – Vilnius, 2013. – Vol. 15, Issue 1. – P. 65–71.
11. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-е вид. допов. і перероб. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.
12. Petrashchuk S. Solving Problem of Thermal Conduction for Providing Strength of Electronic Units on Thermal Impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy. Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016): MATEC Web of Conferences (Tomsk, April 19-21, 2016). – Vol. 72. – P. 5.
13. Kovtun I. Thermal stress in encapsulated electronic packages / I. Kovtun, S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), (Odessa, Ukraine, 9–13 September, 2019). – P. 6.
14. Ройзман В. П. Идентификация физико-механических характеристик полимерных материалов / В. П. Ройзман, И. И. Ковтун, С. А. Петрашук // Вестник Технологического университета Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 4, ч. 1. – С. 18–25.

References

1. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
2. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.
3. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York : McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.
4. DSTU 2634–94. Electronic components. Methods of estimation of conformity with demands on dependability. – Valid from 1995-07-01. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 1995. – 4 p.
5. DSTU 7655:2014. Electronic components. General standards for reliability and testing methods. – Valid from 2015-07-01. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2009. – 9 p.
6. DSTU 8216:2015. Electronic components. Classification by conditions of exploitation and standards of resistance to external impacts. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2017. – 11 p.
7. Reliability prediction for space radio engineering devices based on the simulation of stress-strain conditions : Monograph / S. B. Suntsov, V. P. Alekseev, V. M. Karaban, S. V. Ponomarev. – Tomsk : Publishing of Tomsk. st. un. of control systems and radio engineering, 2012. – 114 p.
8. Talitskii E. N. Protection of electronic devices from mechanical impacts. Theoretical fundamentals / E. N. Talitskii. – Vladimir : Vladimir st. un., 2001. – 256 p.
9. Singh T. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages / T. Singh., P. Viswanadham. – Boston : Chapman & Hall, MA: Springer, 1998. – P. 363.
10. Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment / V. Royzman, S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Lokoshchenko // Journal of Vibroengineering. – Vilnius, 2013. – Vol. 15, Issue 1. – P. 65–71.
11. Strength of materials / G. S. Pisarenko, V. A. Agaev, A. L. Kvitka, V. G. Popkov, Y. S. Umanskiy. – 2-nd Edition. – Kiev : Technika, 1967. – 792 P.
12. Petrashchuk S. Solving Problem of Thermal Conduction for Providing Strength of Electronic Units on Thermal Impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy. Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016): MATEC Web of Conferences (Tomsk, April 19-21, 2016). – Vol. 72, P. 5.
13. Kovtun I. Thermal stress in encapsulated electronic packages / I. Kovtun , S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), (Odessa, Ukraine, 9–13 September, 2019). – P. 6.
14. Royzman V. P. Identification of physical and mechanical characteristics of polymeric materials / V. P. Royzman, I. I. Kovtun, S. A. Petrashchuk // Herald of Technological university of Podillia. – Khmel'nitsly : TUP, 2002. – 4, Iss. 1. – P. 18-25.

БОЙКО Ю. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>e-mail: boikojulius@ukr.net

ПОЛІКАРОВСЬКИХ О. І.

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0002-1893-7390>e-mail: polalexey@gmail.com

ТКАЧУК В. П.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>e-mail: tkachukv.p@gmail.com

АВДЄЄВ В. М.

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0001-8136-4989>e-mail: avdieiev.v.m@gmail.com

СВИСТУНОВ О. С.

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0002-8474-1978>e-mail: office@novator-tm.com

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА

В статті проведено аналіз сучасного стану питання проектування широкосмугових антенних систем для розробки пеленгаційних комплексів БПЛА. Здійснено опис прототипу антенної системи на основі елементу антени Вівальді. Встановлено експериментальну залежність між геометричними параметрами і характеристиками антени. Проведено моделювання запропонованої конструкції широкосмугової антенної системи засобами математичного моделювання. Розглянуто методики налаштування запропонованої антенної системи в діапазоні частот за різних умов збудження. Визначено основні тренди у зміні основних параметрів запропонованої антенної системи у широкому діапазоні частот можливої експлуатації.

Ключові слова: БПЛА, антена, пеленгація, діаграма спрямованості, широкосмуговий випромінювач.

Juliy BOIKO, Vitaliy TKACHUK

Khmelnytskyi National University

Oleksiy POLIKAROVSKYKH

Odessa National Maritime University

Victor AVDIEIEV, Oleksiy SVISTUNOV

State Enterprise "Novator"

MODELING THE CHARACTERISTICS OF A BROADBAND ANTENNA SYSTEM FOR UAV DIRECTION FINDING

The paper presents the results of the development and modelling of a broadband antenna system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) direction finding. The research covered the issues of analytical description of the antenna system based on the prototype - the Vivaldi antennas. The article presents a mathematical description of the Vivaldi antenna element model. An experimental relationship between the geometrical parameters and characteristics of the antenna has been established. A review of the current state of the issue of designing antenna systems based on the concept of building ultra-wideband directional antenna elements in the absence of a phase centre has been carried out. The main trends in the modern design of broadband antenna systems are determined. The main parameters of the proposed broadband antenna are determined by the method of mathematical modelling. The parameters of the proposed antenna in the frequency range under various excitation conditions are studied, and the specifics of the application of such a system under the conditions of its possible use as part of UAV direction-finding complexes are given. The most optimal design option for an ultra-wideband antenna element is a design with an expanding slot (similar to Vivaldi antennas). At present, these antennas are widely used in various devices, namely, in radio reconnaissance devices, medical equipment, etc. Their popularity is due to the presence of advantages over other antennas, among which are a wide operating frequency range, simple design, simple manufacturing requirements, and high gain. In this paper, we considered Tapered Slot Antenna - an antenna with a widening slot. The antenna element designed and modelled in the article is a modified Vivaldi antenna (an antenna with a quasi-slot line with expansion), which is being developed for the direction-finding complex of the UAV. When calculating the TSA of the antenna element, the program for calculating the characteristics of the antennas MMANA was used in order to accelerate the study of the main laws for obtaining the required characteristics. Particular attention was paid to the possibility of changing the radiation pattern (RP) depending on the phase relations of the voltage at the input of the antenna elements.

Keywords: UAV, antenna, direction finding, radiation pattern, broadband antenna emitter.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розробка конструкцій надширокосмугових (НШП) антен є актуальним завданням. Інтерес до таких антен пояснюється тим, що вони потрібні в багатьох галузях радіотехніки [1, 2]. Застосування широкосмугових або надширокосмугових антен в інформаційних системах дозволяє збільшити ширину каналу прийому. НШП-антени відмінно інтегруються в системи приладів виявлення, точного

позиціонування та радіолокації [3]. На основі таких антен стає можливою реалізація вбудованих функціональних пересувних систем. Тому дослідженням та розробкам НШП-антен приділялося багато уваги протягом десятиліть та було розроблено багато типів НШП-антен [4].

Оптимальним варіантом конструкції надширокосмугового антенного елемента є конструкція з щілиною, що розширюється (подібно до антен Вівальді) [1]. В даний час ці антени широко використовуються в різних пристроях, а саме пристроях радіорозвідки, медичної техніки і т. п. Їх популярність викликана наявністю переваг відносно інших антен, серед яких можна виділити: широкий діапазон робочих частот, нескладна конструкція, прості вимоги до виготовлення, високий коефіцієнт підсилення [5].

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є розробка моделі широкосмугового випромінювача, визначення характеристик спрямованості, частотних характеристик даного випромінювача, розгляд можливості застосування даного випромінювача в якості антенного елемента при побудові пеленгаційних антенних решіток (АР) для радіолокації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [6-9].

У даній роботі буде розглядатися TSA (абревіатура від англ. Tapered Slot Antenna) - антена з щілиною, що розширюється. Антенний елемент який розроблено та промодельовано у статті, є модифікованою антеною Вівальді (антена із квазіщілинною лінією з розширенням) яка розробляється для пеленгаційного комплексу БПЛА.

Аналіз досліджень та публікацій

Розглянемо аналітичний опис методів дослідження конструкції антени Вівальді рис. 1 [1, 2].

У відповідності до рис. 1, антена Вівальді представляє собою надширокосмуговий друкований випромінювач який побудований на основі щілинної лінії яка розширюється. В цьому випадку узгоджений перехід між лінією щілини яка не випромінює і вільним простором може бути здійснений за допомогою експоненційної щілинної лінії у формі щілини Вівальді [1]. Така конструкція в результаті перетворює біжучі поверхневі хвилі у випромінювальні хвилі витоку. Залежність між геометричними параметрами і характеристиками антени була встановлена експериментально [2]. Експоненційна конусність тонкої металевої антени Вівальді яка розташована в площині XY (рис. 1 б) може бути описана точками $P1$ та $P2$ в точках з координатами $(X1, Y1)$ і $(X2, Y2)$ відповідно, а також коефіцієнтом розкриття R .

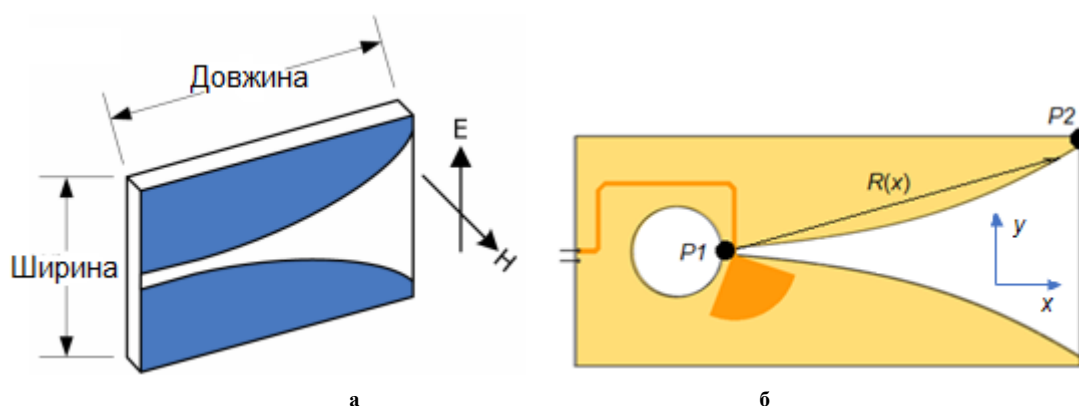


Рис. 1. Конструкція елемента антени Вівальді: а – 3D – репродукція; б – схема з параметрами для аналітичного опису

Між точками $P1$ та $P2$ експоненційний конус описується наступними диференціальними рівняннями:

$$\frac{dy}{dx} = Ry + C, \quad (1)$$

де R – представляє собою коефіцієнт кривизни розкриття антени, а C – буде відображати зміщення від y яке обране так, що $P1$ та $P2$ є точками на лінії $y(x)$, рис. 1 б.

Тоді загальний розв'язок рівняння (1) буде мати вид:

$$y = C_1 e^{Rx} + C_2 \quad (2)$$

або

$$C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (3)$$

і

$$C_2 = \frac{y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}. \quad (4)$$

Таким чином, математична модель верхньої вигнутої кромки елемента антени може бути представлено як:

$$R(x) = x e_{\square x} + \left| C_1 e^{Rx} + C_2 \right| e_{\square y}, \quad x_1 \leq x \leq x_2. \quad (5)$$

Довжина ділянки кривизни елементу антени буде описуватись математично наступним чином:

$$l(x) = \int_{\xi=x_1}^x \left| R(\xi) \right| d\xi = \frac{1}{R} \left[\sqrt{1 + (C_1 R)^2 e^{2Rx}} - \operatorname{arctanh} \left(\sqrt{1 + (C_1 R)^2 e^{2Rx}} \right) \right]. \quad (6)$$

Таким чином для представлення кривих які описують пелюстки антени Вівальді можна використати пару рівнянь [1]:

$$x = x_1 + K(x_2 - x_1), \quad (7)$$

$$y = \frac{(y_2 - y_1) e^{R(x_1 + K(x_2 - x_1))} + y_2 e^{Rx_2} - y_1 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}. \quad (8)$$

У формулах 6-8 використано такі позначення: $R(\xi)$ – похідна від $R(x)$ де R – радіус кривизни пелюстки антени; y_1 – координата перекриття пелюстки антени відносно осі абсцис (рис. 1б); y_2 – відстань від середини верхньої частини антени до пелюстки – розкриття антени; x – змінна яка належить інтервалу $0 \dots x_2$ і яка визначає функцію y , що визначає зміну кривої пелюстки від перекриття до розкриття антени; x_1 – змінна яка визначає нижню точку початку пелюстки антени; x_2 – висота пелюстки та висота всієї антени (рис. 1 а); K – значення коефіцієнту.

На теперішній момент часу розвитку антенних систем для проектування пеленгаційних комплексів БПЛА можна виділити конструкції антен фірми TCI [10], зокрема моделі 641, 643. Загалом конструкції таких антен ґрунтуються на описаних вище загальних положеннях відносно параметрів антени Вівальді. Однак, ключова особливість таких антен полягає у застосуванні надширокопосмугових спрямованих елементів антени які не мають фазового центру. Антена містить системи типу TEM-рупор, (побудована на двох ідентичних дзеркально вигнутих одна відносно одної провідних пластини) із смужками які розширюються, причому кожна із смужок розділена на дві частини щілиною (аналогічно розглянутій вище антені Вівальді, рис. 1 а). На рис. 2 а та б, відповідно, представлено конструкції антен TCI:



Рис. 2. Конструкція антен TCI: а – TCI 641; б – TCI 643

Аналіз конструктивних особливостей антенних систем без фазового центру, дозволяє констатувати, що основа конструкції таких надширокопосмугових антен містить сукупність TEM-рупорів і антен Вівальді. Серед схожих рішень, в предметній області статті, можна виділити антенні системи фірм Rohde&Schwarz на основі фазованих антенних решіток, симетричних антенних вібраторів та антен рамкового типу [5].

Як було зазначено у постановці завдання на дослідження у запропонованій статті розглядаються результати моделювання відносно нової конструкції антени яка розробляється для пеленгації БПЛА та містить концепцію TSA. Теорія цих антен описана вище. Потрібно зазначити, що уточнення конкретного завдання на проектування антенної системи дає різноманітність форм та пропорцій між її конструктивними елементами. При аналізі існуючої інформації з даного питання було з'ясовано такі закономірності для TSA:

- ширина щілини визначає нижню частоту робочого діапазону;
- довжина визначає підсилення в середині та на верхньому краю смуги частот;
- форма розімкнутої щілини визначає частотні характеристики антенного елемента. Вважається, що найбільш прийнятними частотними характеристиками володіють TSA з експоненційно наростаючою шириною щілини (рівняння 5).

У статті буде представлено результати моделювання характеристик антенної системи за допомогою засобів програмного моделювання. Проведемо короткий огляд програмного забезпечення для моделювання антен.

Існує великий вибір у програмного забезпеченні для моделювання електромагнітних полів, антен і пристроїв надвисоких частот (НВЧ) [11, 12]. Нижче наведено основні виробники САПР НВЧ та деякі інші програмні продукти.

FEKO – це широкофункціональне програмне середовище для чисельного електромагнітного

моделювання, засноване на сучасних обчислювальних технологіях (CEM) і дозволяє вирішувати широке коло завдань.

HFSS – це стандартизований у промисловості інструмент для моделювання тривимірних електромагнітних полів. Технологія HFSS дозволяє виконувати розрахунок електричних та магнітних полів, струмів, S -параметрів, випромінювань полів у ближній та дальній зоні. Процес виконання розрахунку повністю автоматизований, користувачеві необхідно лише визначити геометричні параметри, властивості матеріалів і бажаний результат.

CST MICROWAVE STUDIO використовує всі традиційні методи моделювання, а також сучасний часовий метод. Пакет створено німецькою компанією Computer Simulation Technology (CST).

Програмний пакет CST MICROWAVE STUDIO – це узагальнений результат багаторічних досліджень та розробок у галузі ефективного чисельного моделювання тривимірних електродинамічних структур. Це інструмент для швидкого і точного моделювання надвисокочастотних пристроїв, а також аналізу проблем цілісності сигналів і електромагнітної сумісності в часовій та частотній областях з використанням прямокутної або тетраедральної сіток розбиття. Необхідність вивчення програмного продукту CST MICROWAVE STUDIO обумовлено тим, що проектування досить складних, отже, і дорогої радіоелектронної апаратури без застосування САПР у мінімальні терміни і якісно просто неможливе [13]. Проектування займає тривалий час, а потім ведеться експериментальна доробка, яка затягується на тривалий період, збільшуючи вартість РЕА.

Моделювання характеристик антенної системи

На даний момент існує безліч статей, що описують процес моделювання, розрахунку та виробництва друкованих випромінювачів, зокрема антен Вівальді [1, 2].

При розрахунку TSA антенного елемента була використана програма розрахунку характеристик антен MMANA з метою прискорення вивчення основних закономірностей отримання необхідних характеристик.

Особливу увагу приділялося можливості зміни діаграми спрямованості (ДС) залежно від фазових співвідношень напруги на вході антенних елементів. Для пояснення, наведено зовнішній вигляд і частотні характеристики ДС при синфазних сигналах на входах вібраторів антен, рис. 3 і при протифазному збудженні антенних вібраторів – на рис. 4.

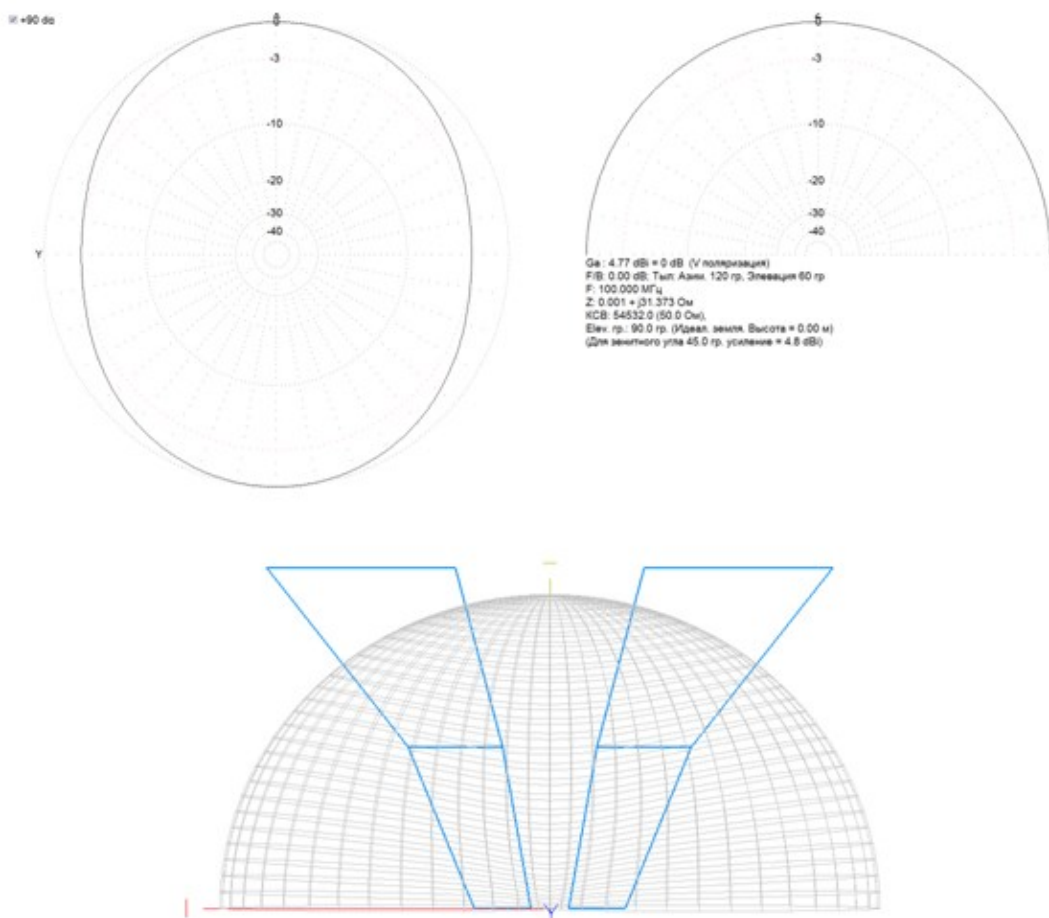


Рис. 3. Зовнішній вигляд антенного елемента та його характеристики при протифазному збудженні вібраторів

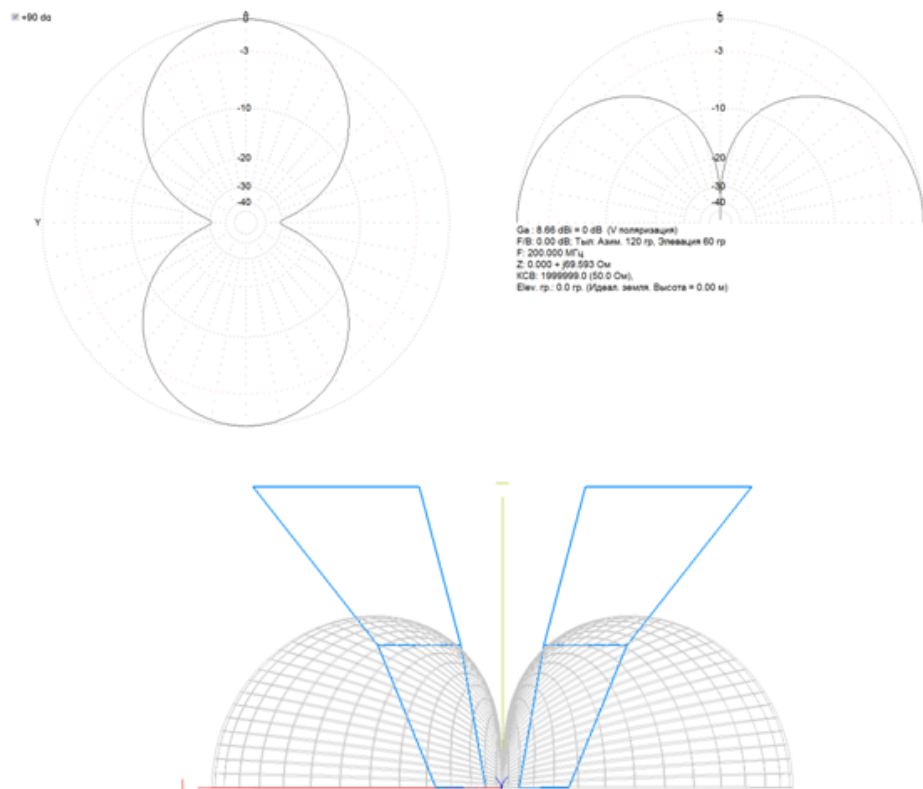


Рис. 4. Зовнішній вигляд антенного елемента та його характеристики при синфазному збудженні вібраторів

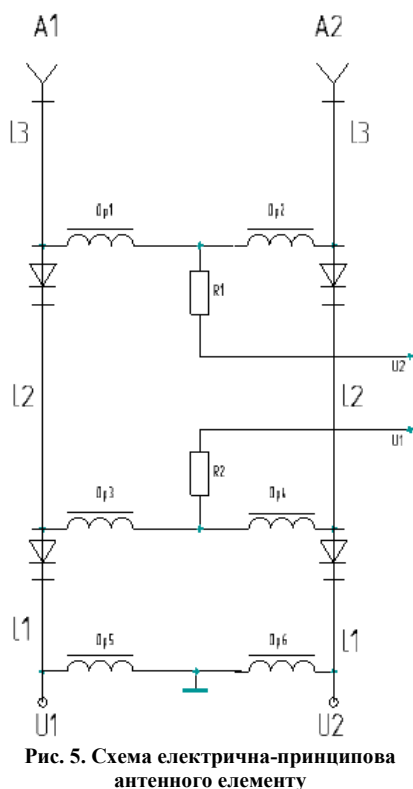


Рис. 5. Схема електрична-принципова антенного елемента

Як видно з рис. 3 та рис. 4, не змінюючи конструкцію антенного випромінювача можна отримати абсолютно різні ДС змінюючи фазові співвідношення на входах антенних вібраторів. Цю особливість буде використано при побудові амплітудного пеленгатора БПЛА з високою роздільною здатністю. Розглянемо особливості розробки широкосмугового випромінювача антенної системи.

У процесі проведення розрахунків було з'ясовано наступне:

- не можливо забезпечити перекриття необхідного діапазону частот 100-3000 МГц простим антенним елементом TSA;
- неможливо отримати прийнятний коефіцієнт стоячої хвилі (КСХН) антенного елемента у широкому частотному діапазоні;
- форма ДС антенного елемента зберігає прийнятні характеристики діапазону частот в межах октави.

Для усунення перерахованих недоліків пропонується конструкцію антенного елемента розбити на три складові, які необхідно буде з'єднати за схемою представленою на рис.5.

У випадку відсутності керуючого напруги $U1$ і $U2$ робочою ділянкою випромінюючого елемента є $L1$ обох випромінюючих вібраторів і випромінюючий елемент забезпечує необхідні характеристики у верхній частині робочого діапазону частот.

При подачі керуючої напруги $U1$ - робочою ділянкою випромінюючого елемента є $L1$ разом з $L2$. В цьому випадку

випромінюючий елемент має хороші характеристики в середній частині робочого діапазону (тоді як у верхній і нижній частині робочого діапазону вони значно гірші). І нарешті, при подачі керуючої напруги $U2$ робочою ділянкою випромінюючого елемента є вся його поверхня, що забезпечує хороші робочі характеристики нижньої частини робочого діапазону частот.

Розрахунок випромінюючого елемента проводився в три етапи: спочатку розраховувалася оптимальна структура у високочастотній частині робочого діапазону, потім - в середньочастотній частині і нарешті в низькочастотній частині. На рис. 6 представлено характеристики антенного елемента у випадку синфазного збудження за відсутності керуючої напруги.

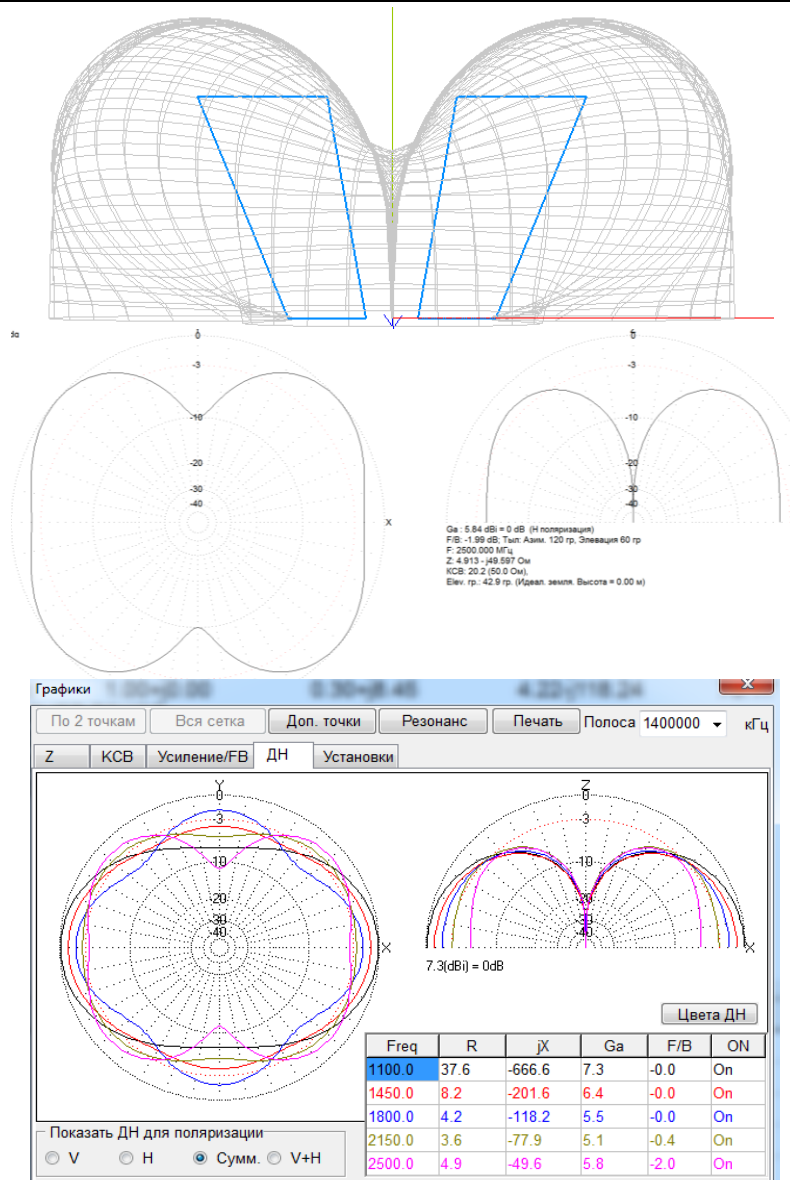


Рис. 6. Характеристики антенного элемента при синфазному збудженні за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина)

На рис. 7 представлено характеристики антенного елемента у випадку протифазного збудження за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина).

Результати моделювання дозволяють дослідити процес зміни характеристики спрямованості випромінювача в робочому діапазоні частот. Зокрема на рис. 6 та рис. 7 представлено просторові ДС випромінювача та коефіцієнти підсилення (КП) в робочому діапазоні частот.

З рис. 6 та 7 встановлюємо, що в діапазоні частот 1100-2500 МГц (ВЧ частина робочого діапазону) антенний елемент має хороші характеристики по ДС, коефіцієнту підсилення і КСХН (див. рис. 8).

При подачі керуючої напруги U_1 до основного антенного елемента підключається другий відрізок до двох вібраторів, що практично переводить антени в середню ділянку частотного діапазону. При цьому у ВЧ частини діапазону його характеристики погіршуються, а в НЧ частини робочого діапазону спостерігається погане узгодження і невисокий коефіцієнт підсилення. Робочі характеристики антенного елемента представлені на рис. 9–12. Середня частина робочого діапазону займає смугу від 400 до 1200 МГц.

Подачею керуючої напруги U_2 переводиться в робочий стан вся конструкція антени, що забезпечує хороші робочі характеристики в нижній частині робочого діапазону. При цьому характеристики антенного елемента в ВЧ стають ще гіршими (спотворюється ДС та з'являються бічні пелюстки, наявність яких вкрай небажана при побудові пеленгаційних пристроїв), а у середній частині діапазону характеристики ДС погіршуються.

Таким чином розбивши робочий діапазон частот на три ділянки можна перекрити діапазон частот 100-2500 МГц з хорошими робочими характеристиками.

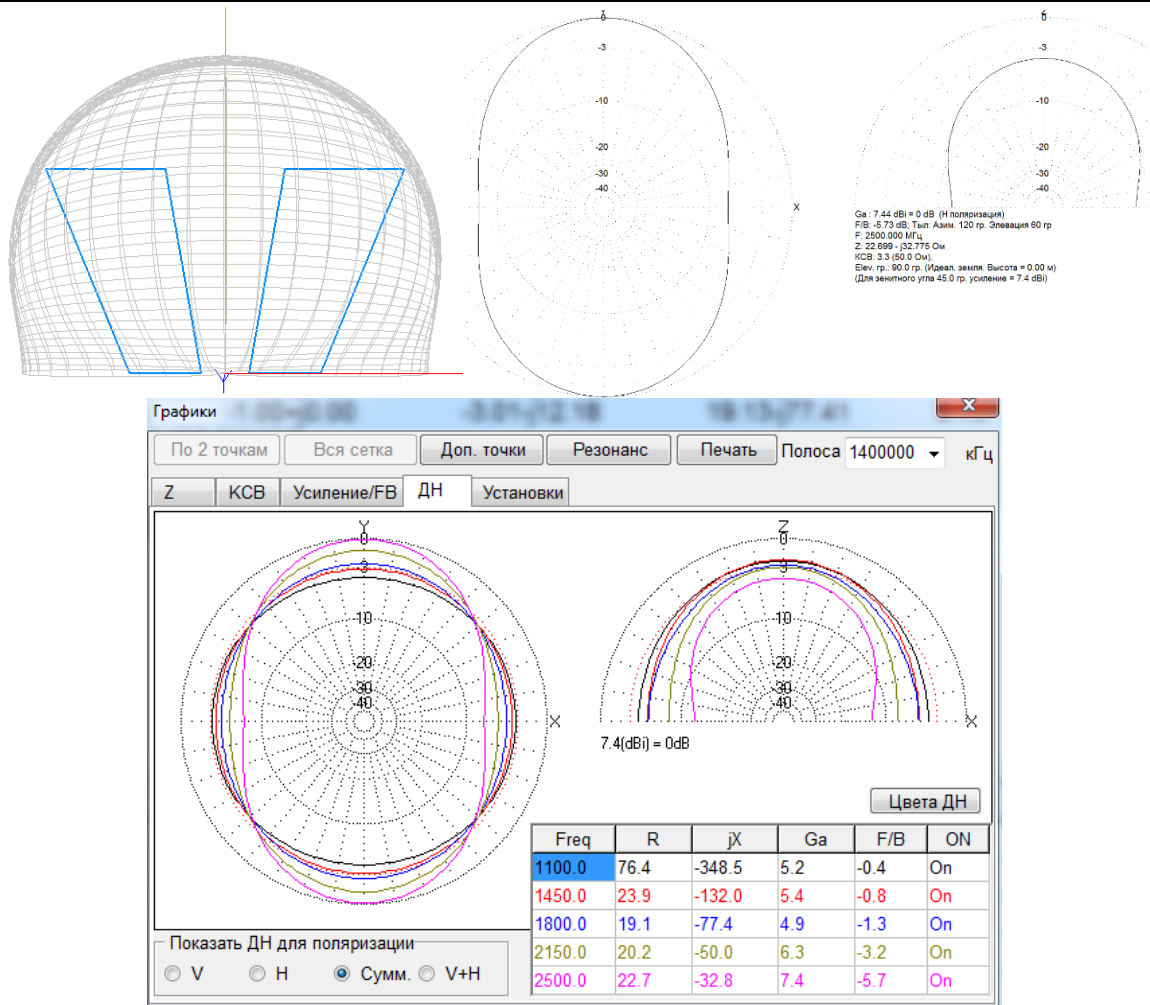


Рис. 7. Характеристики антенного элемента у випадку протифазного збудження за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина)



Рис. 8. Характеристики КСХН антенного элемента при протифазному збудженні за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина)

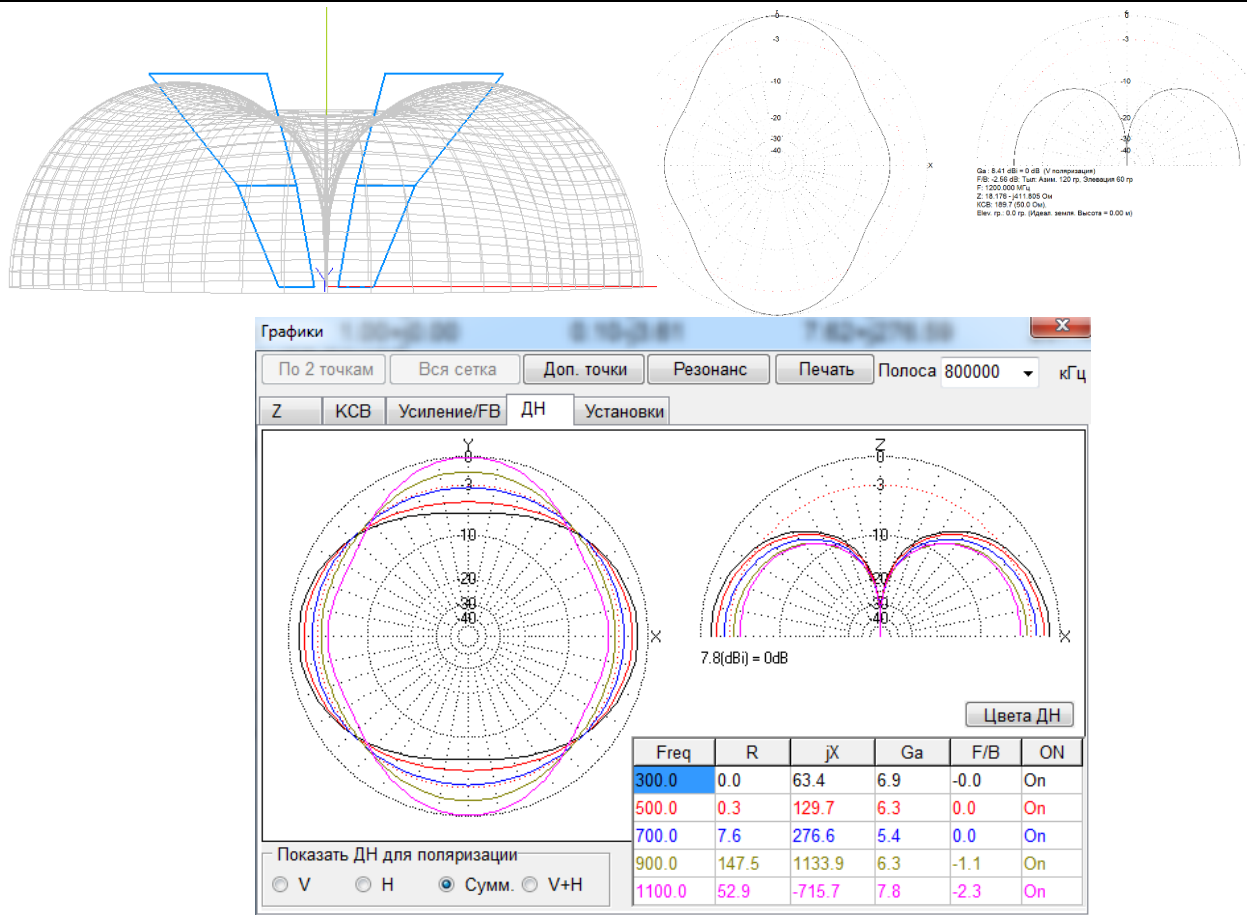


Рис. 9. Характеристики ДС антенного елемента при синфазному збудженні за наявності керуючого напруги U1 (середня частина частотного діапазону)

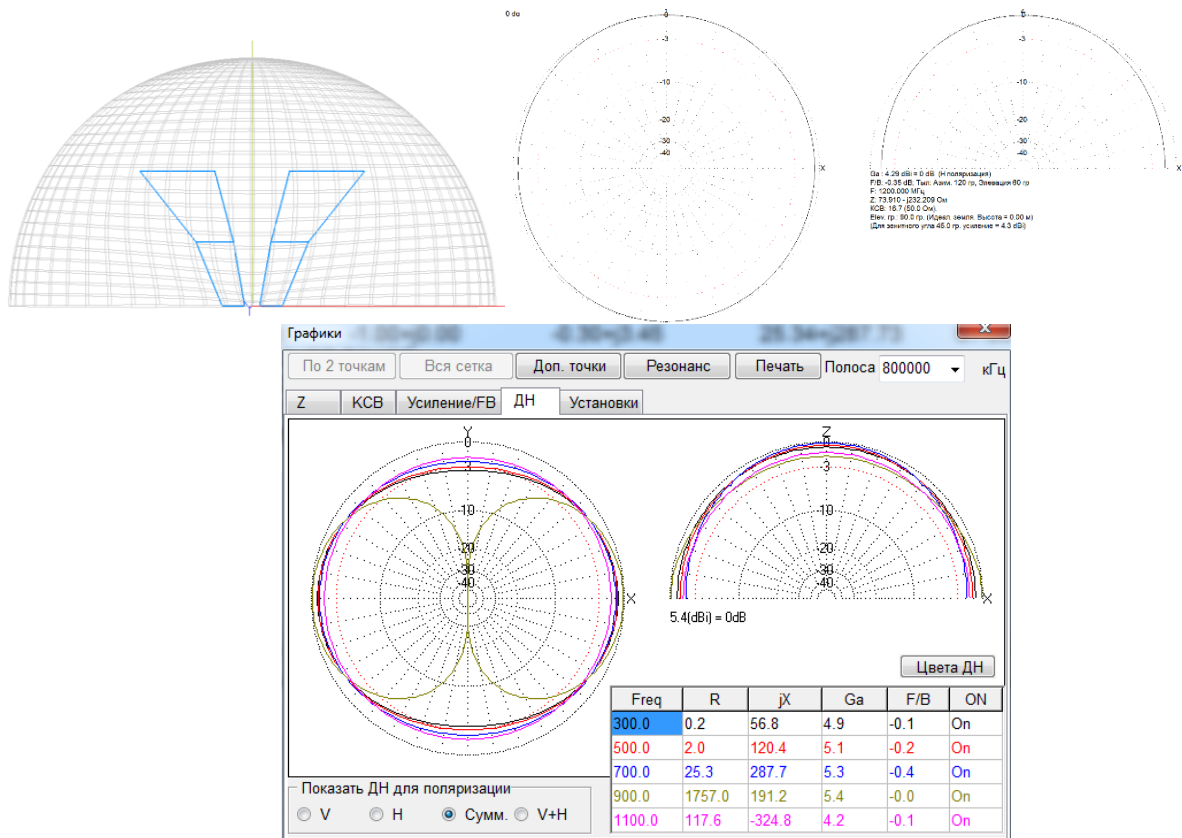


Рис. 10. Характеристики ДС антенного елемента при протифазному збудженні за наявності керуючого напруги U1 (середня частина частотного діапазону)

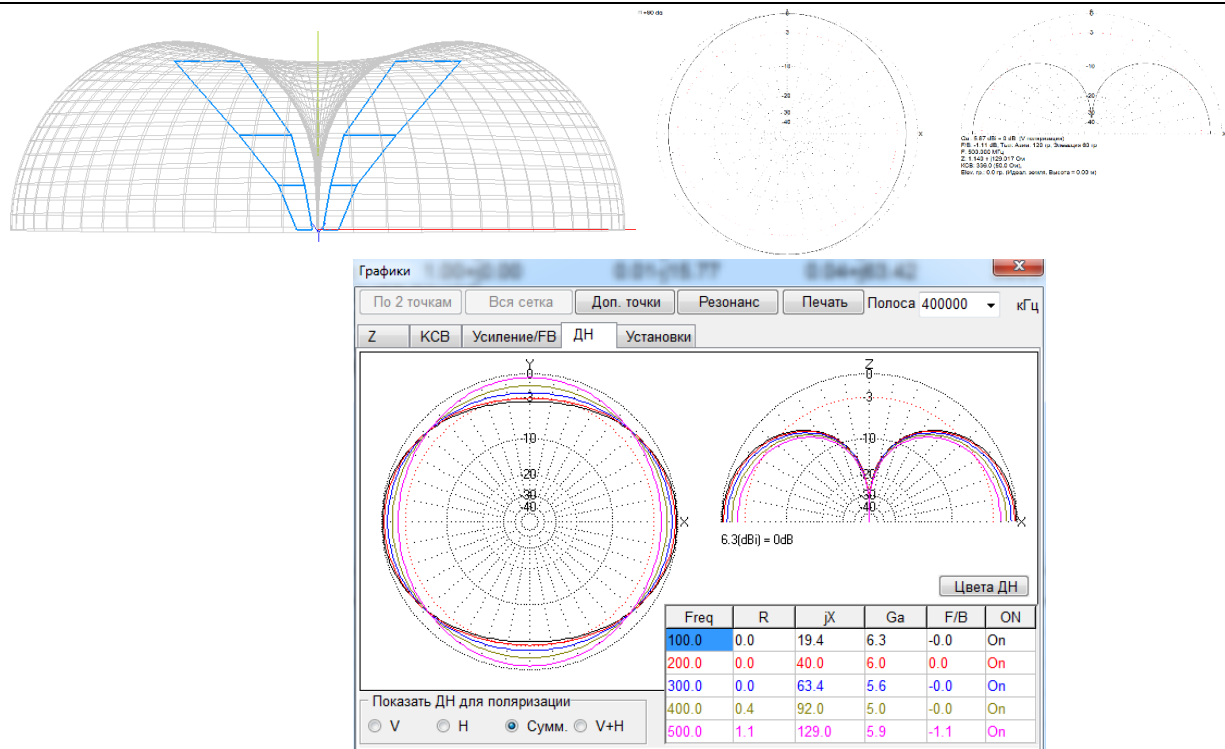


Рис. 11. Характеристики ДС антенного елемента при синфазному збудженні за наявності керуючого напруги U_2 (НЧ частина робочого діапазону)

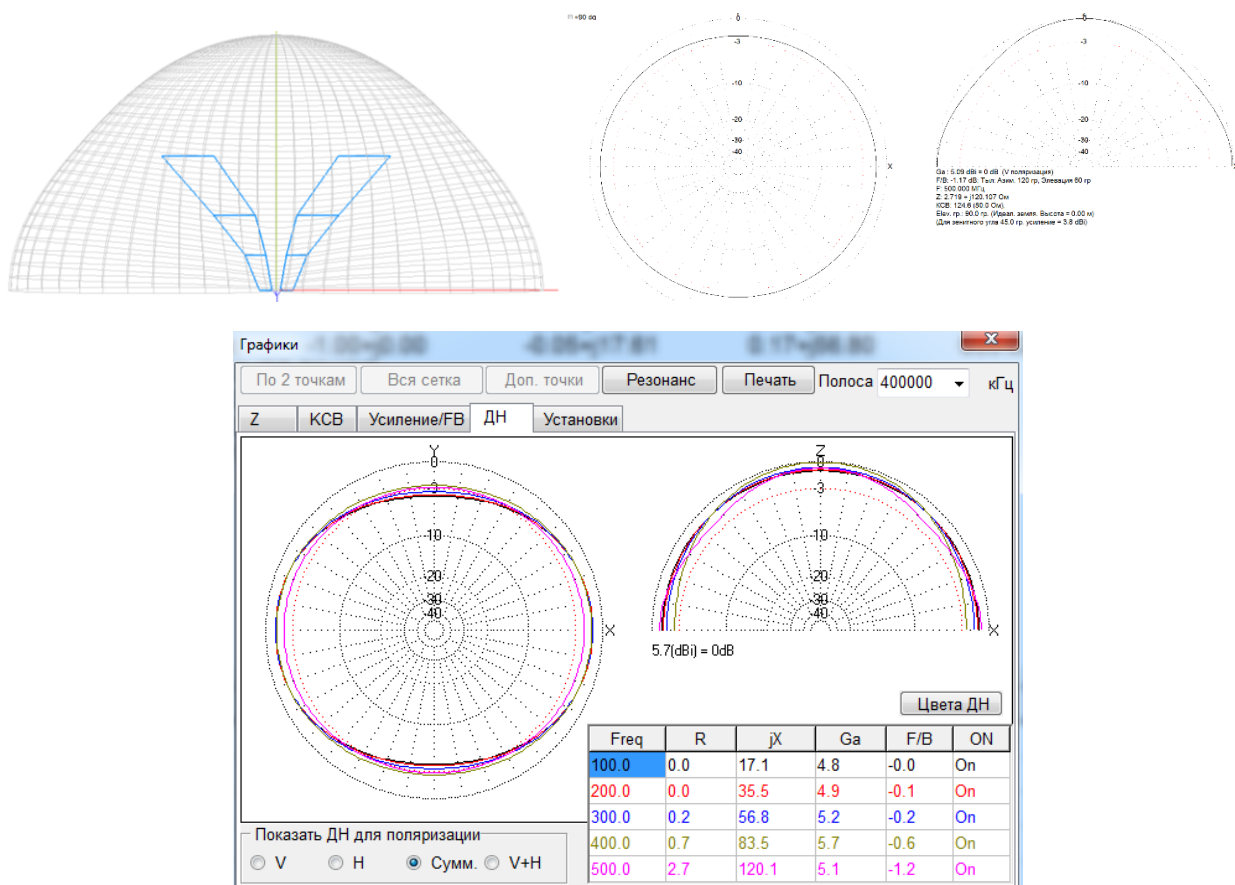


Рис. 12. Характеристики ДН антенного елемента при протифазному збудженні за наявності керуючого напруги U_2 (НЧ частина)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі представлено результати розробки та моделювання ширококутової антенної системи для пеленгації БПЛА. Дослідження охопили питання аналітичного опису антенної системи на основі прототипу – антени Вівальді. У статті наведено математичний опис моделі антенного елемента Вівальді. Встановлено експериментальну залежність між геометричними параметрами і характеристиками антени. Проведено огляд сучасного стану питання конструювання антенних систем на основі концепції побудови

надширококутних спрямованих елементів антени за відсутності фазового центру. Визначено основні тренди у сучасному проектуванні наширококутних антенних систем. Методом математичного моделювання визначено основні параметри запропонованої ширококутної антени. Досліджено параметри запропонованої антени в діапазоні частот за різних умов збудження та наведено специфіку застосування такої системи в умовах її можливої експлуатації у складі пеленгаційних комплексів БПЛА.

Література

1. Shin J. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays / J. Shin, D. H. Schaubert // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47. 5. – P. 879–886.
2. Stockbroeckx B. Copolar and cross-polar radiation of Vivaldi antenna on dielectric substrate / B. Stockbroeckx, A. Vander Vorst // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48. – No. 1. – P. 19–25.
3. Boiko J. Evaluation of phase-frequency instability when processing complex radar signals / J. Boiko, L. Karpova, O. Eromenko, Y. Havrylko // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – T. 10. – № 4. – P. 4226–4236.
4. Rahmat-Samii Y. Array Feeds for Reflector Surface Distortions Compensation: Concept and Implementation / Y. Rahmat-Samii // IEEE Trans. Ant. Prop. – 1990. – Vol. 32. – P. 20–26.
5. Parhomey I. R. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar / I. R. Parhomey, J. M. Boiko, O. I. Eromenko // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2016. – Vol. 77, no. 2. – P. 75–84.
6. Appadwedula S. Direction-Finding Results for a Vector Sensor Antenna on a Small UAV / S. Appadwedula, C.M. Keller // Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing. – 2006. – P. 74–78.
7. Ghaemi K. A Small-Aperture, Ultrawideband HF/VHF Direction-Finding System For Unmanned Aerial Vehicles / K. Ghaemi, R. Ma, N. Behdad // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66(10). – P. 5109–5120.
8. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1. – С. 184–190.
9. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
10. 803E VHF/UHF/SHF COMINT SYSTEM [Electronic resource] / TCI INTERNATIONAL, 2004-2014. – 8 p. – Access mode: <http://www.mpssme.ae/WEB/datasheets/tci/TCI803E.pdf> (date of appeal: 30.03.2022).
11. Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE / А.А. Курушин. – М. : One-Book, 2014. – 433 с.
12. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ : учебное-пособие для вузов / [Д. И. Воскресенский, С. Д. Кременецкий, А. Ю. Гринёв, Ю. В. Котов]. – М. : Радио и связь, 1988. – 240 с.
13. Гурский Д.Н. Вычисления в MATHCAD 12 / Д.Н. Гурский. – СПб : Питер, 2006. – 578 с.

References

1. Shin J. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays / J. Shin, D. H. Schaubert // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47. 5. – P. 879–886.
2. Stockbroeckx B. Copolar and cross-polar radiation of Vivaldi antenna on dielectric substrate / B. Stockbroeckx, A. Vander Vorst // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48. – No. 1. – P. 19–25.
3. Boiko J. Evaluation of phase-frequency instability when processing complex radar signals / J. Boiko, L. Karpova, O. Eromenko, Y. Havrylko // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – T. 10. – № 4. – P. 4226–4236.
4. Rahmat-Samii Y. Array Feeds for Reflector Surface Distortions Compensation: Concept and Implementation / Y. Rahmat-Samii // IEEE Trans. Ant. Prop. – 1990. – Vol. 32. – P. 20–26.
5. Parhomey I. R. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar / I. R. Parhomey, J. M. Boiko, O. I. Eromenko // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2016. – Vol. 77, no. 2. – P. 75–84.
6. Appadwedula S. Direction-Finding Results for a Vector Sensor Antenna on a Small UAV / S. Appadwedula, C.M. Keller // Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing. – 2006. – P. 74–78.
7. Ghaemi K. A Small-Aperture, Ultrawideband HF/VHF Direction-Finding System For Unmanned Aerial Vehicles / K. Ghaemi, R. Ma, N. Behdad // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66(10). – P. 5109–5120.
8. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1. – С. 184–190.
9. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
10. 803E VHF/UHF/SHF COMINT SYSTEM [Electronic resource] / TCI INTERNATIONAL, 2004-2014. – 8 p. – Access mode: <http://www.mpssme.ae/WEB/datasheets/tci/TCI803E.pdf> (date of appeal: 30.03.2022).
11. Kurushin A.A. Shkola proektirovaniya SVCh ustrojstv v CST STUDIO SUITE / A.A. Kurushin. – M. : One-Book, 2014. – 433 s.
12. Avtomatizirovannoe proektirovanie anten i ustrojstv SVCh : uchebnoe-posobie dlja vuzov / [D. I. Voskresenskij, S. D. Kremeneckij, A. Ju. Grin'ov, Ju. V. Kotov]. – M. : Radio i svjaz', 1988. – 240 s.
13. Gurskij D.N. Vychislenija v MATHCAD 12 / D.N. Gurskij. – SPb : Piter, 2006. – 578 s.

ЄВСЕЄНКО О. М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>e-mail: olegyevseienko@gmail.com

КАЧАНОВ П. О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-0781-0853>e-mail: kpa@kpi.kharkov.ua

ПОБУДОВА SCADA-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРИМІЩЕНЬ ТОРГОВЕЛЬНОГО ЦЕНТРУ

Стаття присвячена дослідженню технологічних процесів обігріву, кондиціювання та вентиляції приміщень з метою розробки автоматизованої системи контролю мікроклімату приміщень торговельного центру, що дає змогу оцінити підходи підвищення енергоефективності використання енергоресурсів. Це питання є актуальним з огляду на те, що поточні системи контролю мікроклімату не є енергоефективними, а використання автоматизованих систем диспетчеризації дозволить отримувати інформацію про поточний стан роботи системи. Це допоможе зменшити витрати на роботу обладнання за рахунок збору та обробки інформації в реальному часі, упровадження нових законів керування. Для досягнення поставленої мети було проаналізовано існуючі системи контролю мікроклімату та визначено, що їх можна вдосконалити шляхом застосування SCADA-системи. Досліджено поточні реалізації контролю параметрів торговельних центрів та на основі цього аналізу отримано вимоги до побудови SCADA-систем. Розроблена система контролю дає можливість побудувати систему управління мікрокліматом приміщень торговельних центрів, що дозволить виконати ідентифікацію об'єкта керування та спростить упровадження енергоефективних алгоритмів керування. Здійснено огляд алгоритмів керування температурно-вологісними процесами в приміщеннях торговельного центру. Отримано загальний перелік вхідних-вихідних параметрів вентиляційної установки. За допомогою цих параметрів побудовано структурну схему підключення. Вибрано обладнання, за допомогою якого можна побудувати автоматизовану систему керування. Розроблено мнемосхеми оператора для відстеження параметрів мікроклімату. Розроблено візуалізації процесу входу в систему, вибору приміщення та задання уставок керування. Практичне значення дослідження полягає в розробці апаратно-програмного комплексу керування системою.

Ключові слова: торговельний центр, SCADA-система, автоматизоване керування, апаратно-програмний комплекс, вентиляція та кондиціювання.

Oleh YEVSIEENKO, Petro KACHANOV

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

SHOPPING MALL PREMISES SCADA-MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT

The article is devoted to the shopping malls technological processes of heating, air conditioning and ventilation control studying. In order to develop a shopping mall microclimate control automated system temperature, humidity and ventilation control laws were analysed. Literature review shows that current microclimate control systems are not energy efficient and the usage of supervisory control and data acquisition systems can provide information of the current system state and decrease energy consumption. It is stated that using SCADA-system helps to reduce equipment operating costs by collecting and processing real-time information and implementing new energy-efficient control laws. To achieve this goal, the existing microclimate control systems were analysed. It was determined that these systems can be improved by using the SCADA system. Current implementations of shopping malls control parameters are investigated. Based on investigated control parameters the requirements of SCADA-systems construction were received. It was shown that the developed control system simplifies shopping malls microclimate control system construction, control object identification and energy-efficient control algorithms implementation. An overview of temperature and humidity processes in the shopping malls control algorithms was made. The list of input-output parameters of ventilation system control has been made. Using these parameters, the structural scheme of connection was built. The equipment of an automated control system is described. Operator visualization for microclimate parameters tracking have been developed. Visualizations of the authorization, room selection and setting control settings have been designed. The practical significance of the study lies in the hardware and software system control development.

Keywords: shopping mall, SCADA-system, automated control, hardware and software complex, ventilation and air conditioning.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розвиток світової економіки супроводжується зростанням потреб на використання енергоресурсів. Від забезпечення ними господарства країни залежить розвиток її економіки. Держава може імпортувати енергоресурси, або налагодити власний видобуток. Проте вичерпність енергоресурсів, збільшення світової ціни на їх видобуток та транспортування, проблеми, пов'язані із забрудненням навколишнього середовища, роблять актуальним завдання їх енергозбереження.

SCADA-система, або автоматизована система управління технологічними процесами – це програмний пакет, призначений для збору, обробки, візуалізації інформації про стан технологічного процесу об'єкта керування в реальному часі. Ці системи встановлюються на об'єктах, де потрібен контроль оператором за станом об'єкта управління. SCADA-система лише відображає інформацію, отриману від приладів контролю про стан об'єкта, а остаточне рішення про задання параметрів керування приймається

оператором. Необхідність використання та впровадження таких систем обумовлена складністю об'єкта управління, необхідністю забезпечити керування процесами в небезпечних та критичних областях.

Торговельний центр – це великий за площею об'єкт, який складається із приміщень різного призначення, куди приходять люди для здійснення покупок та відпочинку. Створення людям комфортного мікроклімату та їхня безпека є першочерговою задачею при проектуванні, будівництві та використанні торговельних центрів.

Забезпечення функціонування торговельного центру та підтримання комфорту вимагає певних енергетичних витрат. Оплата цих витрат лягає на орендаторів приміщень, а, отже, на покупців у вигляді збільшення цін на товари та послуги. Тому існує потреба у зниженні витрат на енергоспоживання. Як показують дослідження, витрати на використання енергоресурсів у системах опалення та кондиціювання займають близько 40 % від загальної кількості витрат [1].

Існують такі шляхи зниження енергоспоживання в торговельних центрах:

1. Оновлення системи освітлення на енергозберігаючі лампи.
2. Оптимізація розкладу роботи закладу.
3. Проведення технічного обслуговування опалювальних систем.
4. Використання датчиків, наприклад, прив'язати роботу частини системи освітлення до датчиків руху.

5. Інвестування в системи енергозбереження.

Система керування торговельним центром може складатися з наступних підсистем: освітлення, обігріву за допомогою котельні або індивідуального теплового пункту, холодильного центру, електропостачання, керування ліфтами та ескалаторами, пожежної безпеки, вентиляції та кондиціювання.

Кожна з підсистем може обслуговуватися різними компаніями, а системи керування можуть бути побудовані на різних програмних пристроях та в різних додатках. Для оператора, який відслідковує поточний стан підсистем, може бути незручним перемикання між програмами. Тому постає питання у створенні єдиної системи контролю за процесами торговельного центру, якою може бути SCADA-система.

Аналіз досліджень та публікацій

У роботі [2] побудована SCADA-система торговельного центру для визначення та сигналізації про пожежу. Надаються рекомендації щодо вибору програмованого логічного контролера, датчиків для визначення пожежі. Описано переваги використання програмованого логічного контролера (ПЛК) у побудові систем керування.

У роботі [3] порушується питання енергозбереження та підвищення якості електроенергії в промислових мережах. Для вирішення цих питань пропонується використовувати SCADA-систему, а саме програмний продукт PowerStudio.

У роботі [4] пропонується створювати систему керування освітленням на базі контролера Arduino, перевагою якого є легкість установлення і невелика кількість зусиль на обслуговування. Проте використання ПЛК, на протипагу дослідженню [3], має перевагу в розширеному діапазоні робочих температур, стійкості до електричних перешкод, вібрацій, пилу та вологи [2].

У роботах [5, 6, 7] підтверджується необхідність створення автоматизованих систем керування на SCADA-системах у розподільчих мережах [5], керування інфраструктурою нафтогазодобування і транспортування [6], контролю стану відновлювальних джерел енергії (сонячних батарей, вітрогенераторів) [7]. Використання цих рішень надає суттєві переваги: надійність, контроль, моніторинг, логування подій. Так, у [5] вказується, що призначення SCADA-системи – це відображення складових частин управління процесами об'єкта в реальному часі. Також підтверджується необхідність її використання в розподільчих мережах.

У роботі [8] зазначено, що використання SCADA-системи може дозволити накопичити дані про об'єкт керування. Далі ці дані можуть використовуватися для побудови системи управління з прогнозуванням.

Серед переваг використання SCADA-системи [9] виокремлюються наступні: зменшення часу пусконаладжувальних робіт, часу внесення змін у проект та часу виявлення й усунення несправності. Упровадження системи моніторингу дозволило виявити раніше не діагностовані несправності обладнання. А в [10] розкрито наступні переваги: наочне відображення інформації, цілодобовий контроль технологічних процесів, зниження впливу людського фактору, швидка і достовірна діагностика стану об'єктів, авторизований доступ до інформації й управління, ведення журналу подій в автоматичному режимі.

Серед недоліків, які виділяються в [11], вказується, що процес створення SCADA-системи є складним і трудомістким. Виконання цієї роботи під силу тільки висококваліфікованому та злагодженому колективу співробітників, і передувати їй мають результати понад десяти стадій.

Усе це дає можливість стверджувати, що використання SCADA-систем дозволить побудувати розподілену надійну систему з можливістю ідентифікації параметрів об'єкта керування, синтезу рішень та алгоритмів керування щодо підвищення енергоефективності об'єкта управління.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка апаратно-програмного комплексу системи вентиляції та кондиціювання повітря торговельного центру за рахунок використання SCADA-системи, що дозволяє отримувати

Herald of Khmelnytskyi national university, Issue 3, 2022 (309)

1. Вентиляція. У даному режимі вентилятор працює на заданій швидкості. Жодні показники датчиків не використовуються.
2. Вентиляція з обігрівом.

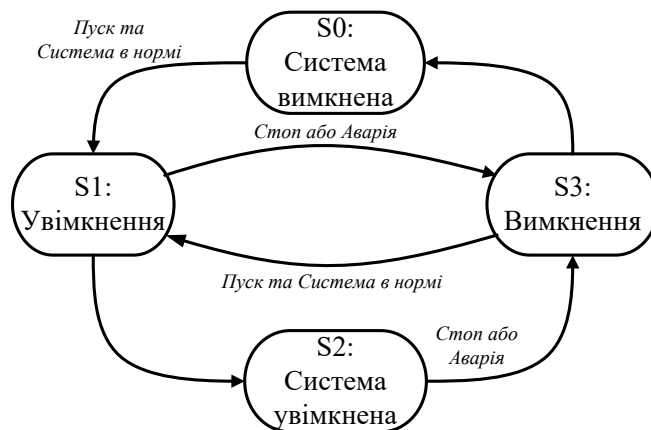


Рис. 2. Граф автомату стану роботи вентиляційної установки

Вентиляція з обігрівом призначена для підігріву приміщення. У даному режимі використовуються показники датчиків температури в приміщенні, температури припливного повітря, вентилятор та нагрівачі. Нагрівач у своєму складі має ступені.

Керування обігрівом здійснюється за допомогою ПІД-закону керування. Кожна ступень оцінюється у 100 % потужності. Дискретна ступень, як правило, використовується як базова. Робота нагрівача в залежності від поточної температури і уставки демонструється за допомогою рис. 3.

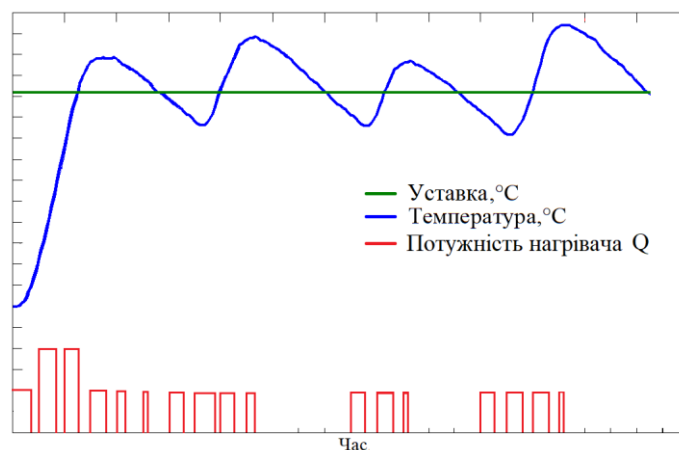


Рис. 3. Графік роботи нагрівача в режимі вентиляція з обігрівом

Якщо система має дві ступені, а саме: аналогову та дискретну, то сумарна потужність буде дорівнювати 200 %. Тоді при контролі від 0 % до 100 % здійснюється керування за допомогою аналогового управління за ШІМ-законом керування. Далі, при переході через 100% вмикається дискретна ступень, а подальше управління здійснюється знову за допомогою аналогової ступені.

Алгоритм роботи вентилятора: під час активації режиму вентилятор переходить на задану користувачем швидкість. Якщо потужність роботи нагрівача максимальна протягом заданого інтервалу часу, то йде збільшення швидкості вентилятора на одиницю. Якщо працює одна ступень вентилятора на значення потужності менше 50%, то з точки зору енергозбереження швидкість вентилятора зменшується на одиницю.

3. Вентиляція з охолодженням. Вентиляція з охолодженням використовуються для охолодження приміщення. Алгоритм роботи холодильника здійснюється за двопозиційним законом керування. Алгоритм роботи вентилятора наведено на рис. 4.

4. Провітрювання від вуглекислого газу. У даному режимі використовуються показники датчика вуглекислого газу та вентилятор. Алгоритм керування наступний: під час активації режиму вентилятор переходить на задану для режиму швидкість. Далі йде порівняння поточного та необхідного значення вуглекислого газу. Якщо поточне значення вуглекислого газу менше, ніж задане, то вентилятор зменшує швидкість роботи на одиницю. Інакше йде збільшення швидкості на одиницю. Змінна швидкості обмежена значеннями заданої мінімальної та максимальної швидкості повітря. Такий алгоритм порівняння значень показань датчика й уставок здійснюється через заданий період часу. Такий режим роботи демонструє рис. 4.



Рис. 4. Графік роботи вентилятора

5. Провітрювання від вологості. Режим провітрювання від вологості аналогічний режиму провітрювання від вуглекислого газу, тільки параметром, за яким здійснюється провітрювання, є показання датчика вологості. Роботу даного режиму демонструє рис. 4.

6. Зимово-літній режим. Режим зима-літо є ще одним режимом для організації роботи обладнання. Зимовий та літній періоди визначаються за температурою зовнішнього повітря. Для створення цього режиму існує дві уставки: уставка температури зовнішнього повітря та уставка гістерезису температури. Якщо температура зовнішнього повітря опускається нижче уставки температури зовнішнього повітря, то активізується зимовий режим, якщо перевищує значення уставки температури зовнішнього повітря + гістерезис температури, то літній режим. Графік роботи в зимово-літньому режимі наведено на рис. 5.

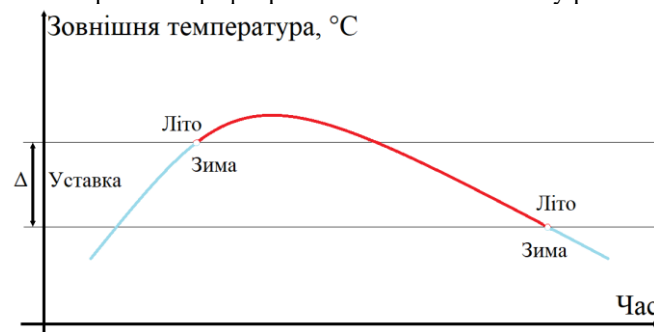


Рис. 5. Визначення сезону зима-літо

Зазвичай значення гістерезису температури (Δ) встановлюється в діапазоні від плюс 3 °C до плюс 5 °C. Під час роботи в режимі зима здійснюється підігрів клапану припливного повітря та підтримання температури припливного повітря. У літній період це не здійснюється.

7. Робота за розкладом. Робота за розкладом може реалізовуватись у двох варіаціях: будні та вихідні дні, або подововий розклад. Параметри, які задаються у вигляді блоку параметрів: поточний режим, час увімкнення та час вимкнення режиму, швидкість вентилятора, уставка температури нагрівача або охолодження, уставка вуглекислого газу, вологості. Параметри цього блоку є однією точкою. Задана кількість точок формує параметри контролю для заданої доби в подововому розкладі.

Якщо режим будні та вихідні дні, то існує два блока параметрів. Процес задання розкладу роботи для режиму будніх та вихідних днів наведено на рис. 6.

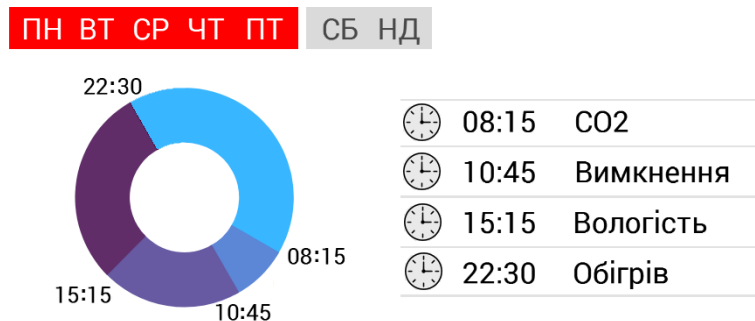


Рис. 6. Задання розкладу керування для режиму будні та вихідні дні

Окрім роботи в заданому режимі, системою здійснюється контроль аварійних та позаштатних ситуацій. Можливою реакцією на аварійну ситуацію, що виникла, є переведення системи у стан вимкнення з виконанням індикації аварії, унесення інформації в журнал аварій.

Реакцією на позаштатну ситуацію, наприклад, на засмічення фільтру, є попередження з продовженням роботи системи. Які ситуації вважати аварійними, а які позаштатними, налаштовує користувач.

Виділяються наступні аварійні ситуації:

1. Пожежа.
2. спрацював тепловий захист вентилятора.
3. спрацював пресостат вентилятора.
4. Перешкода відкриттю або закриттю заслінки.
5. Забруднення фільтру.
6. Несправність датчика зовнішньої температури.
7. Несправність датчика температури припливного повітря.
8. Несправність датчика температури зворотної води.
9. Несправність насоса теплообмінника.
10. Несправність термостату.
11. Температура повітря в каналі менше заданої температури (наприклад, менше 2°C).
12. Відсутність імпульсів від тахометра вентилятора.
13. Відсутність зв'язку між компонентами системи.

Виходячи зі списку датчиків, виконавчих пристроїв, режимів роботи, можна скласти перелік вхідних-вихідних сигналів (табл. 1). В табл. 2 наводяться параметри керування в приміщенні торговельного центру.

Таблиця 1

Перелік вхідних-вихідних сигналів для вентиляційної установки

№	Назва	Позначення	Тип сигналу
1	Клапан припливного повітря повністю відкритий	LS	DI
2	Відкрити клапан припливного повітря	M1	DO
3	Диференціальний тиск на фільтрі	PDS1	DI
4	Увімкнути водяний теплонагрівач	Tov1	DO
5	Увімкнути водяний насос	M2	DO
6	Увімкнути запорно-регулюючий клапан	Y1	DO
7	Датчик температури зворотної води	TE2	AI
8	Увімкнути капілярний термостат	TS1	DI
9	Увімкнути вентилятор припливного повітря	Вп	DO
10	Термозахист керування	M3	DI
11	Керування вентилятором для однієї швидкості	M3	DO
12	Аналогове керування швидкостями вентилятора	M3	AO
13	Датчик диференціального тиску на вентиляторі	PDS2	DI
14	Зовнішнє керування станом виконавчих пристроїв	Пуск – Стоп	DI
15	Пожежа	Пожежа	DI
16	Наявність аварії	Загальна аварія	DI
17	Датчик температури припливного повітря	TE1	AI
18	Датчик температури повітря в приміщенні	TE2	AI

Таблиця 2

Перелік вхідних-вихідних сигналів приміщення торговельного центру

№	Назва	Позначення	Тип сигналу
1	Клапан припливного повітря повністю відкритий	LS	DI
2	Регулювання клапану припливного повітря	M1	AO
3	Датчик диференціального тиску на вентиляторі	PDS2	DI
4	Пожежа	Пожежа	DI
5	Датчик температури припливного повітря	TE1	AI
6	Датчик температури повітря в приміщенні	TE2	AI

Виходячи з інформації з табл. 1, для керування вентиляційною установкою потрібно 3 сигнали аналогового входу, 1 сигнал аналогового виходу, 8 сигналів дискретного входу, 6 сигналів дискретного виходу, а з табл. 2 – для керування параметрами приміщення необхідно 2 сигнали аналогового входу, 1 сигнал аналогового виходу, 3 сигнали дискретного входу.

Під час підбору обладнання рекомендується сигнали, які відносяться до керування вентиляційною установкою, винести в окремий модуль, а сигнали для збору даних і керування виконавчими пристроями в приміщенні винести окремо.

Центральним компонентом збору та обробки даних є комп'ютер з установленною SCADA-системою. Інформація у SCADA-систему про поточний стан датчиків і виконавчих пристроїв має надходити від центрального програмованого логічного контролера (ЦПЛК). ЦПЛК може збирати дані з інших ПЛК, які безпосередньо керують виконавчими пристроями (рис. 7).

ЦПЛК обрано контролер фірми Siemens S7-1200, що разом з модулями розширення може обслуговувати від 10 до 284 дискретних та від 2 до 51 аналогового каналів входів-виходів.

Для комунікації зі SCADA-системою вибрано Ethernet. Для комунікації з іншими ПЛК використовується інтерфейс RS-485 по протоколу Modbus у режимі Master. Локальне керування здійснюється за допомогою ПЛК в режимі Modbus Slave.

SCADA

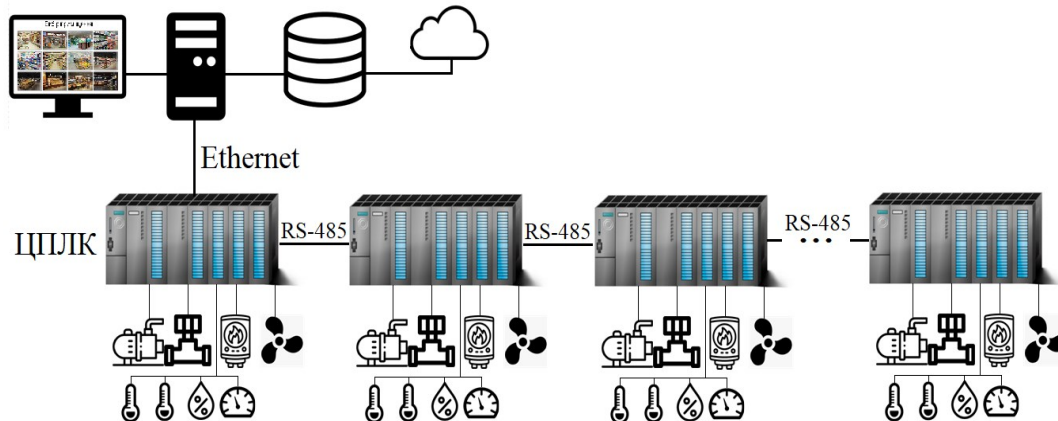


Рис. 7. Загальна структурна схема автоматизації торговельного центру

Мнемосхема SCADA-системи повинна складатися з авторизації користувача, вікна задання уставок, вибору приміщення, журналу аварійних ситуацій. Для доступу до керування SCADA-системою користувачу потрібно ввести логін та пароль, тобто авторизуватися (рис. 8). Контроль доступу ділиться на групи: гість, оператор, адміністратор. Права в користувачів відрізняються кількістю функцій, які доступні до виконання.

Рис. 8. Вікно авторизації

Далі оператору надається інформація про поточний стан торговельного центру. Користувач може обрати конкретне приміщення (рис. 9), або подивитися журнал аварій (рис. 10). У правому верхньому куті зазвичай наводиться інформація про авторизованого користувача, наявність активних аварій, температуру і вологість зовнішнього повітря. Знизу може розташовуватися панель задач, на якій виводиться поточна дата та час.

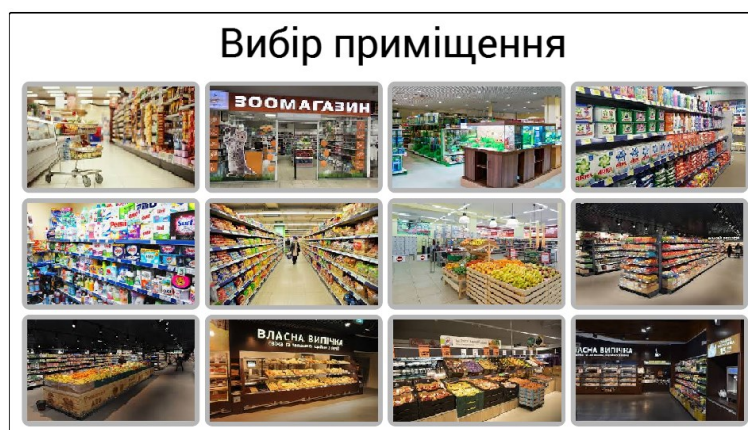


Рис. 9. Мнемосхема вибору приміщення

	Час	Текст повідомлення	Завершено	Підтверджено	Підтвердив
	07.05 20:19:14	Високий тиск у системі	07.05 20:19:59	07.05 20:19	Адміністратор
	07.05 20:19:13	Пожежа	07.05 20:19:58	07.05 20:19	Адміністратор
	07.05 20:19:12	Засорення фільтра	07.05 20:19:57	07.05 20:19	Адміністратор
	07.05 20:19:11	Здійснено запуск системи	07.05 20:19:56	07.05 20:19	Адміністратор
	07.05 20:19:10	Спрацював пресостат	07.05 20:19:55	07.05 20:19	Адміністратор

Після вибору приміщення відкривається мнемосхема (рис. 11). На ній оператор бачить поточний стан показань датчиків, стан роботи виконавчих пристроїв, тобто дізнається про поточний стан роботи системи.

Рис. 11. Вікно задання уставок

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

З використанням SCADA-системи розроблено мнемосхеми для диспетчеризації торговельного центру, які відображають інформацію та спрощують прийняття рішень при виникненні аварійних ситуацій.

5. Working phases of SCADA system for power distribution networks / Shalini S. K. J [et al.] // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2, Iss. 5. – P. 2037–2043.

6. Chauhan R. K. Intelligent SCADA System / R. K. Chauhan, M. L. Dewal, K. Chauhan // International Journal on power system optimization and Control. – 2010. – Vol. 2, No. 1. – P. 143–149.
7. Monitoring of renewable energy systems by IoT - aided SCADA system [Electronic resource] / O. Qays [et al.] // Energy Science & Engineering. – 2022. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.1130>. – DOI: 10.1002/ese3.1130/ (accessed 09.05.2022).
8. Бугаєва Л. М. Інтелектуальний аналіз як необхідний інструмент для ефективного використання баз даних систем SCADA / Л. М. Бугаєва, Ю. О. Безносик, І. А. Сидоренко // Topical issues of the development of modern science: Abstracts of III Intern. Sci. and Practical Conf. Софія, Болгарія. – 2019. – С. 422–426.
9. Міркевич Р. М. Розробка програмного каркасу для контролерів базової системи керування процесом з урахуванням вимог до інтегрування з іншими підсистемами і реалізації сервісних функцій діагностики та обслуговування / Р. М. Міркевич, В. А. Путятіна // Перша Міжнародна конференція «Проблеми виведення з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення оточуючого середовища». – Славутич, 2016. – С. 161–165.
10. Катаєва Є. Ю. АСУ ТП SCADA-System в застосуванні інтелектуалізації проектування технологічного процесу / Є. Ю. Катаєва, А. В. Павлов // Молодий вчений. – 2017. – № 10 (50). – С. 50–54.
11. Великодний С. С. Реінжиніринг систем моніторингу та дистанційного управління судновими енергетичними установками / С. С. Великодний // Автоматика – 2015 : матеріали XXII міжнар. конф. з автоматичного управління. – Одеса, 2015. – С. 133–134.

References

1. HVAC Energy Breakdown. URL: <https://www.environment.gov.au/system/files/energy/files/hvac-factsheet-energy-breakdown.pdf> (accessed: 09.05.2022).
2. Baksi M. Design of fire detection and alarm system using PLC SCADA for shopping mall / M. Baksi, B.N. Phadke, P. Patel // Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences. – 2014. – Vol. 1, No. 4. – P. 7–10.
3. An Approach Towards Prepaid Metering System using PowerStudio SCADA / A. Wasaya [et al.] // 4th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE). – Lahore, 2021. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICECE51984.2021.9406294.
4. Patil N. Review on Energy Efficient Intelligent Lighting System / N. Patil, A. C. Wani // International Conference on Global Trends in Engineering, Technology and Management (ICGTETM–2016). – Bambhori, Jalgaon, 2016. – P. 433–436.
5. Working phases of SCADA system for power distribution networks / Shalini S. K. J [et al.] // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2, Iss. 5. – P. 2037–2043.
6. Chauhan R. K. Intelligent SCADA System / R. K. Chauhan, M. L. Dewal, K. Chauhan // International Journal on power system optimization and Control. – 2010. – Vol. 2, No. 1. – P. 143–149.
7. Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system [Electronic resource] / O. Qays [et al.] // Energy Science & Engineering. – 2022. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.1130>. – DOI: 10.1002/ese3.1130/ (accessed 09.05.2022).
8. Buhaieva L. M. Intelktualnyi analiz yak neobkhdnyi instrument dlia efektyvnoho vykorystannia baz danykh system SCADA / L. M. Buhaieva, Yu. O. Beznosyk, I. A. Sydorenko // Topical issues of the development of modern science: Abstracts of III Intern. Sci. and Practical Conf. Sofiia, Bolhariia. – 2019. – С. 422–426.
9. Mirkevych R. M. Rozrobka prohramnoho karkasu dlia kontrolleriv bazovoi systemy keruvannia protsesom z urakhuvanniam vymoh do intehruvannia z inshymy pidsystemamy i realizatsii servisnykh funkttsii diahnostyky ta obsluhovuvannia / R. M. Mirkevych, V. A. Putiatina // Persha Mizhnarodna konferentsiia «Problemy vyvedennia z ekspluatatsii ob'ektiv yadernoi enerhetyky ta vidnovlennia otocuiuchoho seredovyscha». – Slavutych, 2016. – С. 161–165.
10. Kataieva Ye. Yu. ASU TP SCADA-System v zastosuvanni intelektualizatsii proektuvannia tekhnolohichnoho protsesu / Ye. Yu. Kataieva, A. V. Pavlov // Molodyi vchenyi. – 2017. – № 10 (50). – С. 50–54.
11. Velykodnyi S. S. Reinzhyrnyrh system monitorynha ta dystantsiinoho upravlinnia sudnovymy enerhetychnymy ustanovkamy / S. S. Velykodnyi // Avtomatyka – 2015 : materialy XXII mizhnar. konf. z avtomatychnoho upravlinnia. – Odesa, 2015. – С. 133–134.

ОБГОВОРЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ВИЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНОЛОГІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

Розглянуто напрямки розвитку контролю, як наукової галузі. Показано необхідність вироблення єдиного підходу і єдиної термінології в теорії контролю. Наведено аналіз літературних джерел з проблем визначень і термінології технічного контролю. Наведено і проаналізовано більшість існуючих словникових визначень контролю та технічного контролю, а також їх сучасні трактування. Розглянуто і проаналізовано термінологію, що до пасивного і активного контролю, з урахуванням методів після операційного і технічного контролю. Показано, що універсальність і ємність терміну контроль сприяли його проникненню в різні сфери людської діяльності, зокрема в техніку. Визначено контроль, як родове поняття і це трактування для потреб кількісних досліджень переведено на математичну мову в термінах теорії множини. Наведено ізоморфну математичну модель фізичної моделі об'єкта контролю. Наведені також параметри технічних об'єктів контролю відповідних моделей, що пропонується. Розглянуті результати контролю технічних та інших об'єктів, як необхідна інформаційна база тієї чи іншої виробничої процедури: бракування, сортування, захисту.

Ключові слова: контроль, технічний контроль, визначення, термінологія, математична модель.

Yurii SMOLIN

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

DISCUSSION OF DEFINITIONS AND TERMINOLOGY PROBLEMS OF TECHNICAL CONTROL

The directions of development of control as a scientific branch are considered. It is shown that the variety of definitions of control goes beyond terminological inconveniences and hinders communication of specialists and their creative search, and this necessitates the development of a single approach and a single terminology in the theory of control. A detailed analysis of the existing views of experts on control, the results of their discussions and changes in approaches to terminology that existed in previous years and have developed at this time. The analysis of literature sources on the problems of definitions and terminology of technical control is given. Most of the existing dictionary definitions of control and technical control, as well as their modern interpretations are given and analyzed. There are two main forms of technical control: passive and active control. The terminology related to passive and active control is considered and analyzed, taking into account the methods after operational and technical control. It is shown that the universality and capacity of the term control contributed to its penetration into various spheres of human activity, including technology. Control is defined as a generic concept, and this interpretation for the needs of quantitative research has been translated into mathematical language in terms of set theory. An isomorphic mathematical model of the physical model of the object of control is given, in which the nature of the object of control is not specified, ie it can be technical, economic, biological, etc. The parameters of technical objects of control of the corresponding offered model are also given. It is shown that in terms of control capabilities the main interest is its methodological component, which expresses the essence of control, determines its specific varieties. The results of control of technical and other objects as the necessary information base of this or that production procedure are considered: rejection, sorting, protection. It is proved that when the control results are used to control the technological object, in this case it is not the control of the source object, but the controlled process and the process itself is now the object of control, but not the object of control. Thus, the more developed form of participation of control in management of technological object is its active control.

Key words: control, technical control, definition, terminology, mathematical model, active control.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У техніці, в її різних галузях і напрямках, ще й на цей час, немає єдиного трактування поняття технічний контроль. Технічні визначення контролю переглядалися і модифікувалися в міру розширення сфери його застосування, відображаючи специфіку тих чи інших напрямків дослідження і їх авторське бачення.

Контроль як наукова галузь розвивається в двох напрямках: вищий і глибший. В даний час, коли акценти перемістилися з першого на друге, калейдоскопічність існуючих визначень контролю переростає рамки термінологічних незручностей. Якщо раніше вони лише ускладнювали спілкування фахівців, то зараз перешкоджають їх творчим пошукам. Назріла необхідність вироблення єдиного підходу, єдиної термінології.

Аналіз досліджень та публікацій

В другий половині минулого сторіччя на сторінках ряду вітчизняних журналів та інших видань розгорнулася відкрита дискусія з проблеми контролю. Докладний аналіз поглядів на контроль, що склався на той час, виконаний в роботі [1], а результати дискусії підсумовано в роботах [2,3]. Подальший розвиток цих питань продовжувався у кінці минулого віку в роботах [4,5,6,7]. Потім, на протязі більш двох десятиріч, у результаті об'єктивних причин, в Україні та країнах ближнього зарубіжжя до цих питань практично не торкалися. На початку двадцятого сторіччя з початком відродження промисловості в Україні та, отже науки, ця проблема основних понять і термінів технічного контролю виникає знов. При цьому підхід до термінології декілька змінюється, як це відображено, наприклад, в роботах [8,9,10].

Однак вироблення визначення, що задовольняє всі зацікавлені сторони, так і не відбулися. І по теперішній час термін технічний контроль залишається предметом літературних різночитань, характерні з яких обговорюються нижче по ходу викладу.

Формулювання цілей статті

Чітко визначитися в самому первинному понятті – контроль та технічний контроль, щоб виключити надалі можливі різночитання у змістовному напрямку контрольно-вимірювальної техніки – активному контролі функцій.

Виклад основного матеріалу

Термін контроль походить від французького слова *contrôle* - список, що ведеться в двох примірниках. Спочатку він означав перевірку документації (звітів, звітності), а потім перевірку об'єктів довільної природи. У цьому трактуванні він увійшов в українську та російську мови і вживається в ній [11,12,13,14,15].

Так, словарні визначення мають такий сенс:

Контроль - облік, перевірка рахунків, звітності; контролювати - повірити, перевіряти [11].

Контроль / фр. *contrôle* / - спостереження, нагляд над чим-небудь з метою перевірки [12].

Контроль - перевірка, а також спостереження з метою перевірки [13].

Контроль - перевірка діяльності кого-, чого-небудь; контроль - спостереження за ким, чим-небудь з метою перевірки [14].

Контроль / фр. *contrôle* від *contrerôle* - список, що ведеться в двох примірниках / - перевірка чого-небудь, наприклад, виконання планів, законів, рішень [15].

Якщо звернутися до технічних визначень, то витяги з технічних джерел, в яких прямо або побічно визначається поняття контроль, або його призначення, мають такий сенс:

Контроль - необхідність об'єктивної незалежної перевірки [16].

Контроль виробництва - ряд заходів з управління виробництвом, спрямованих до своєчасного виявлення браку у виробництві і припинення подальшої обробки його, щоб уникнути зайвих витрат виробництва і ведучих до випуску продукції, за якістю задовольняючою вимогам споживачів [17].

Завдання технічного контролю полягає в тому, щоб попереджати брак і забезпечувати випуск високоякісної продукції [18].

Незалежно від того, яка система або метод застосовуються для контролю продукції, метою контролю є завжди забезпечення доцільної однорідності якості продукції [19].

Процес порівняння невідомої величини з іншою відомою, що представляє собою операцію контролю розмірів, може бути виконаний як з участю людини, так і автоматично [20].

Під контролем в техніці зазвичай розуміється сукупність функцій спостереження за ходом будь-яких процесів [21].

Технічний контроль у виробництві - система заходів, що забезпечує доброякісність продукції [22].

Вибір бажаного ходу процесу є одним з елементів управління. Крім того, для успішного ведення процесу необхідно спостерігати за його перебігом та виявляти відхилення від бажаного ходу, щоб впливати на процес в потрібному напрямку.

Таким чином, ... управління - це вибір бажаного ходу процесу, контроль ходу процесу і вплив на систему, що забезпечує бажаний хід [23].

Завдання контролю полягає в порівнянні параметрів контрольованого процесу з заданим їх значенням і фіксуванні результатів порівняння у формі, зручній для спостереження або тривалого зберігання [24].

Контроль - визначення того, що дійсне значення вимірюваної величини знаходиться між граничними її значеннями або поза ними.

Якщо вимір дозволяє лише відповісти на питання «скільки», то контроль дозволяє лише відповісти на питання «так» чи «ні» [25].

Контроль - це процес виявлення подій, що визначають керуючі дії [26].

Контроль - це процес отримання та обробки інформації про стан об'єкта і зовнішніх умовах, метою і завершальним етапом якого є виявлення подій, що визначають керуючі дії [26].

Під автоматичним контролем мається на увазі область автоматики, яка охоплює засоби і методи, що полегшують і вивільняють людину від спостереження за тим або іншим виробничим процесом, за станом тієї чи іншої машини [27].

Процес зіставлення результатів виробничого процесу з нормами, виробленими на основі попереднього досвіду, в техніці називається контролем [28].

Контролем називається процес встановлення відповідності між станом об'єкта контролю і заздалегідь заданою нормою шляхом сприйняття контрольованих параметрів, зіставлення їх з уставками, формування і видачі судження про результат [2].

Попереджувальним або поточним контролем називається спостереження за ходом технологічного процесу, що здійснюється через контроль якості продукції в процесі її виготовлення [29].

Автоматичний контроль - це виконання без участі людини операцій по визначенню працездатності, виявлення несправності та прогнозуванню зміни стану контрольованого об'єкта [30].

Під контролем розуміють встановлення відповідності між стоянням (властивістю) об'єкта контролю і заданої нормою, яка визначає якісно різні області його стану. В результаті контролю видається судження про стан об'єкта контролю [31].

Контролем якості продукції прийнято називати перевірку відповідності показників продукції встановленим вимогам, які можуть бути зафіксовані, наприклад, в стандартах, кресленнях, технічних умовах ... та інших документах [1].

Ступінь придатності об'єктів до подальшого використання, тобто якість об'єктів, можна визначити різними способами. Можна, наприклад, реєструвати точні чисельні значення параметрів, що визначають якість. Такий контроль носить назву контролю за кількісною ознакою. Якщо ж контрольовані об'єкти розбиваються на придатні і дефектні, то такий контроль носить назву контролю за альтернативною ознакою [32].

Контроль вибору задач у аналогових обчислювальних машинах (АОМ) - сукупність операцій, пов'язаних з перевіркою правильності підготовки до вирішення набраної на АОМ структурній схемі моделювання [33].

Контроль у цифрових обчислювальних машинах (ЦОМ) - певний процес, який встановлює наявність несправностей в ЦОМ [33].

Контроль - загальний термін, що означає часткову або повну перевірку на відсутність певних класів помилок або перевірку правильності виконання процесу [34].

Сучасні трактування, як загального визначення контролю, так і технічного контролю, суттєво не відрізняються від вищезгаданих, але підхід до термінології декілька змінюється, як це відображено, наприклад, в роботах [8,9,10].

Контроль (фр. *contrôle, om contrerôle* — *подвійний список*):

1) перевірка, облік, спостереження за чим-небудь;

2) установи, особи, що перевіряють діяльність будь-якої іншої організації або відповідальної особи, звітність тощо;

3) заключна функція управління.

Контроль — одна з основних функцій системи управління. Контроль здійснюється на основі спостереження за поведінкою керованої системи з метою забезпечення оптимального її функціонування (вимірювання досягнутих результатів і співвіднесення їх із очікуваними результатами). На основі даних контролю здійснюється адаптація системи, тобто прийняття оптимальних управлінських рішень [8].

Технічний контроль — це перевірка відповідності об'єкта (продукції або процесу, від якого залежить її якість) встановленим технічним вимогам [9].

Існує термінологія, щодо пасивного і активного контролю. А саме:

Всі «активні» контрольні пристрої є «профілактичними», що попереджають прояв браку.

Пристрої «пасивні» є «інспекційними», контролюючими готові вироби [20].

Активним признається такий вид контролю, результати якого викликають зміну параметрів технологічного процесу і впливають на якість продукції, що випускається. Пасивний контроль дозволяє нам тільки судити про фізичні якості контрольованого об'єкта [25].

Існують дві основні форми технічного контролю: пасивний і активний контроль.

Пасивний контроль - це контроль при якому встановлюють тільки відповідність або невідповідність ознак якості даного виробу стандартам або технічним умовам, і відповідно до цього виробу поділяють на увазі на придатні і браковані.

Попереджувальним або поточним (активним) контролем називається спостереження за ходом технологічного процесу, що здійснюється через контроль якості продукції в процесі її виготовлення [29].

Контроль активний - контроль деталей безпосередньо в процесі обробки на верстаті або поза верстатом, що дає інформацію про необхідність зміни режимів обробки або підналагодження верстата [15].

Активний контроль - контроль який здійснюється безпосередньо в процесі виготовлення продукції вимірювальними приладами, вбудованими в технологічне обладнання [33].

Поняття «статистичний контроль якості» (активний контроль) ... означає не тільки контроль якості продукції, а й регулювання якості та управління ним шляхом застосування методів математичної статистики [35].

Статистичний (активний) метод контролю якості заснований на систематичному спостереженні за станом технологічного процесу з метою безперервної підтримки якості продукції на певному рівні. Розкриваючи ненормальності в технологічному процесі ще до появи браку, даний метод контролю своєчасно попереджає про необхідність усунення причин, що викликають розладнання процесу, і тим самим усуває ймовірність появи браку.

Методи контролю поділяються на методи післяопераційного (пасивного) і технологічного (активного) контролю. При післяопераційному контролі за допомогою засобів вимірювання фіксуються значення будь-яких параметрів деталей і виробів з метою їх розбраковки або сортування. До активного відноситься будь-який метод контролю, за результатами якого вручну або автоматично здійснюється вплив на технологічний процес [39].

Універсальність і ємність терміну контроль сприяли його проникненню в самі різні сфери людської діяльності, зокрема, в техніку. І хоча технічна література трактує його неоднозначно [16-33], якщо не бути

прискіпливим до слів, в які втілюються технічні трактування, останні, як правило, зберігають риси першоджерела (словникового визначення), фарбуючи їх тим чи іншою видовою ознакою.

Отже, контроль як родові поняття - то перевірка, тобто сукупність дій, що встановлює правильність або помилковість чого-небудь. При цьому маємо на увазі, що «перевірка» - дія за значенням дієслова перевіряти; перевіряти - встановлювати правильність або помилковість чого-небудь [14] та ін.

Незважаючи на гадану невибагливість і простоту, дане трактування досить змістовне і загальне, охоплюючи аналізоване поняття у всіх його численних різновидах. Для потреб кількісних досліджень її доцільно перевести на математичну мову. Це зручно зробити в термінах теорії множини.

Нехай G - множина можливих, а $N \in G$ - множина дозволених станів об'єкта контролю. Передбачаються, що стан об'єкта контролю вичерпне описується будь-яким математичним числовим об'єктом x . Надалі він іменується контрольованим параметром, а N множина його дозволених реалізацій - нормою.

Природа об'єкта контролю не обмовляється. Він може бути технічним, економічним, біологічним тощо.

Множина G є ізоморфна математична модель фізичної моделі об'єкта контролю. Зокрема, це натуральний ряд чисел, n -мірний евклідовий простір, лінійний функціональний простір. Відповідно до цього контрольований параметр буде натуральним числом, векторними величинами і функцією.

Норма N , що представляє собою деяку підмножину множини G , визначає характер вимог, що пред'являються до об'єкту контролю, зазвичай виділяє його якісно однорідні стани (допуск, перший сорт та ін.).

Параметри технічних об'єктів контролю, контрольованих параметрів відповідних їм множин N і G і наведені в таблиці 1.

Контрольований параметр x може бути чи не бути елементом множини N , інакше кажучи, висловлювання:

$$xmN \quad (1)$$

може бути, як істинним, так і помилковим.

Таким чином можна дати таке визначення. Контроль є перевірка істинності висловлювання (1): контрольований параметр належить нормі.

Наслідок (результат) контролю - видача ознаки «так» або «ні» («0» або «1»).

Таблиця 1

Параметри технічного контролю

Об'єкт контролю	Контрольований параметр x	Множина G	Норма N
Резистор	Скалярна величина (опір резистора)	Множина дійсних позитивних чисел	Числовий відрізок
Партія виробів	Ціле невід'ємне число (кількість дефектних виробів в партії)	Множина цілих позитивних чисел, обмежених зверху обсягом партії.	Множина цілих позитивних чисел обмежених зверху допустимим числом дефектних виробів в партії
Нагрівач об'ємної капронової нитки	Скалярна функція (температура нагрівача)	Лінійний функціональний простір	Множина обмежених на відрізьку контролю скалярних функцій
Газо-перекачувальний агрегат	Векторна функція (тиск на вході і виході нагрівача, перепад на конфузори та ін.)	Лінійний простір вектор-функцій	Множина обмежених на відрізьку контролю векторних функцій

Перевірка - практична процедура. Вона включає дві складові - методичну і технічну. Під першою розуміється деякий алгоритм (план дій), під другою - його технічне виконання. Кожна зі складових вносить свою похибку, наслідком чого є можлива неадекватність результату контролю значенням істинності висловлювання (1). Ступінь цієї неадекватності відбивається в понятті якості контролю.

З точки зору можливостей контролю основний інтерес представляє його методична складова. Вона виражає сутність контролю, визначає його конкретні різновиди. Надалі, якщо не обумовлено особливо, технічна складова ідеалізується, тобто вважається, що вона не вносить в результат додаткової похибки.

Виходячи з цього можна зробити таке зауваження. Контроль можна визначити і як встановлення однієї з двох можливих категорій контрольованого об'єкта: норма – не норма.

Таке визначення еквівалентно попередньому. Переносючи акцент з дії (контроль – перевірка) на його результат (контроль - встановлення категорії), воно наочніше виявляє задачу контролю. Разом з тим саме від нього бере початок одне з поширених трактувань контролю, що випадає з його етимологічного русла.

За результатами проведеного аналізу тепер можна розглядати методологію та термінологію такого важливого аспекту, як використання результатів контролю в техніці.

Отримання результатів контролю технічних, як і будь-яких інших об'єктів, не є самоціллю. Вони служать необхідною інформаційною базою тієї чи іншої виробничої процедури: бракування, сортування, захисту.

Бракування та сортування - традиційні приклади практичного використання результатів контролю.

Бракування виробів - це розбивка їх на дві групи: придатні і дефектні. При позитивному результаті контролю виробу його відносять до групи придатних, при негативному - до групи дефектних.

Бракування партії виробів принципово не відрізняється від бракування виробу. Якщо результат контролю партії позитивний, вона застосовується, якщо негативний, бракується. Відмінність - в конкретних алгоритмах контролю.

Сортування виробів - це розбивка (розкладка) їх на кілька різних груп. Вона передбачає попереднє виявлення категорії виробу - відмітної ознаки відповідної йому групи.

Процедура виявлення категорії складається з декількох процедур контролю, які несуть у своїй сукупності інше, в порівнянні з ним, смислове навантаження. Ця процедура є природним узагальненням контролю, як це відзначено вище у зауваженні. Очевидно, тому в техніці за нею збережено той же найменування - контроль. Такому розумінню контролю, по-видимому, сприяла і морфологічна особливість цього слова - збіг форм однини і множини.

В історичному плані це розширене трактування відіграло певну позитивну роль. Відповідаючи традиційній виробничій задачі виявлення сорту готової продукції, вона сприяла значному поширенню самого терміну «контроль в техніці». Нині ж, коли контроль пронизує всі технічні напрями і перед його дослідженнями виросли нові складні задачі, процедуру виявлення категорії виробу зручніше було б поіменувати іншим терміном, можливо «розпізнаванням», як запропоновано в роботі [36]. Це цілком справедливо з урахуванням того, що розпізнавання образів - науковий напрямок, пов'язаний з розробкою принципів і побудовою систем, призначених для визначення приналежності даного об'єкту до одного із заздалегідь виділених класів об'єктів [15].

Власне, бракування або сортування, є рознесення, розкладка виробів на групи за відповідними ознаками. Вони цілком базуються на контролі і є його практичним виходом. Зазвичай бракування (сортування) і контроль тісно пов'язані, сполучені і фізично утворюють як би одне ціле. Деякі автори розглядають їх як єдину процедуру, привласнюючи їй ім'я найголовнішої складової - контролю. Очевидна умовність такого трактування контролю, яка не відтіняє його специфіки. Контроль - не бракування або сортування, а їхня інформаційна основа.

Аналогом бракування виробів є захист динамічного об'єкта. Як і бракування, він базується на контролі. Виконується безперервно в часі, він вловлює сам момент переходу від норми до не норми. Це дозволяє використовувати результати контролю для відключення об'єкта, переведення його на резервне живлення, організації спеціальних нормалізуючих впливів та ін.

Результати контролю можуть використовуватися для управління технологічним об'єктом. Тут управління розуміється в традиційному трактуванні, як здійснення впливів на об'єкт, з метою виконання ним заданого алгоритму функціонування.

Слід підкреслити, що в цьому випадку мова йде про контроль не вихідного об'єкта, а керованого процесу. Відповідно до цього змінюються і вимоги до норми. Нова норма визначає якісно різні стани технологічного об'єкта з точки зору управління, тобто потрібно або не потрібно вводити управляючі дії. Сам процес служить тепер об'єктом управління, але не об'єктом контролю.

Більш розвиненою формою участі контролю в управлінні технологічним об'єктом є його активний контроль - предмет подальших досліджень автора.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За результатами проведеної роботи можна зробити такі висновки:

1. Маючи, як опорне родові поняття «контроль», поняття «технічний контроль» можна визначити подвійно: або, як контроль в техніці, або, як контроль, який здійснюється за допомогою спеціальних технічних засобів.
2. Предметом теорії контролю, як наукової галузі, є реальний контроль (методика контролю), тобто фактична сукупність дій, що виконуються і які встановлюють припустимість або неприпустимість (з точки зору прийнятого в тих чи інших конкретних обставинах критеріях) даної реалізації контрольованого параметру.
3. Сформульовано предмет досліджень контролю на математичній мові, з метою виробити єдиний підхід до вивчення його різних форм і модифікації.

Література

1. Контроль качества продукции в машиностроении / под ред. А.Э. Артреса. - Москва : Изд-во Стандартов, 1974. - 448 с.
2. Электрические методы автоматического контроля / под ред. К.Б. Карандеева. - Москва : Энергия, 1965. - 384 с.
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. - Москва : Наука, 1968. - 400 с.
4. Болычевцев А.Д. Об определении основных понятий технического контроля / А.Д. Болычевцев, И.М. Шенброт // Измерительная техника. - 1984. - №9. - С. 17-19.
5. Болычевцев А.Д. О методологических основах теории контроля / А.Д. Болычевцев, М.П. Цапенко, И.М. Шенброт // Измерительная техника. - 1984. - №10. - С. 21-23.
6. Болычевцев А.Д. Метрологическое обеспечение: понятие, термин, определение / А.Д. Болычевцев, Э.И. Вайхброт, М.П. Цапенко, И.М. Шенброт // Измерительная техника. - 1988. - №4. - С. 55-57.
7. Болычевцев А.Д. О категориях метрологии и их трактовках / А.Д. Болычевцев // Измерительная

техника. - 1990. - №5. - С. 69-70.

8. Осипова Ю.В. Теория контроля идентичности / Ю.В. Осипова // Вестник Московского ун-та. Серия 18. Социология и политология. - 2016. - №22(1) - С. 215 - 224.

9. Когут М.С. Основы взаємозамінності, стандартизації, сертифікації, акредитації та технічні вимірювання : підручник / М.С. Когут. - Львів : Світ, 2010. - 528 с.

10. Болычевцев А.Д. Элементы общей теории технического контроля / А.Д. Болычевцев, Л.А. Болычевцева. - Курск : Курск. гос. техн. ун-т, 2010. - 212 с.

11. Даль В. Толковый словарь живого великорусского языка [в 4 т.Т2] / В. Даль. - Москва : Рус. яз., 1989. - 779 с.

12. Ушаков Д.И. Толковый словарь современного русского языка / под ред. Н.Ф. Татяненченко. - Москва : Альта-Пресс, 2005. - 1216 с.

13. Ожегов С.И. Словарь русского языка / под ред. Н.Ю. Шведовой; АН СССР, Ин-т рус. яз., 23-е изд.испр. - Москва : Рус. яз., 1991. - 917 с.

14. Словарь современного русского литературного языка / гл. ред. С.Г. Бархударов. Москва : Изд. АН СССР, 1956. - 1918 с.

15. Большая Советская Энциклопедия [в 12 т.Т4] Москва : Изд. БСЭ, 1973. - 654 с.

16. Радфорд Г.С. Контроль качества в производстве / Г.С. Радфорд [пер. с англ.] - Москва : Органометалл, 1926. - 332 с.

17. Техническая энциклопедия / гл. ред. Л.К. Мартеев. - Москва : Акционерное общество «Советская энциклопедия», 1930. - 928 с.

18. Журавлёв А.Н. Основы контроля в моторостроении / А.Н. Журавлёв. - Москва : Оборонгиз, 1941. - 236 с.

19. Ачеркан Н.С. Статистические методы контроля / Н.С. Ачеркан. Москва : Машгиз, 1946. - 138 с.

20. Трапезников В.А. Автоматический контроль линейных размеров изделий / В.А. Трапезников. - Москва : Оборонгиз, 1949. - 432 с.

21. Темников Ф.Е. Автоматический контроль / Ф.Е. Темников. - Москва : ВНИТО полиграфии и издательств, 1949. - 120 с.

22. Энциклопедический словарь [в 4 т.Т2]. - Москва : Изд. БСА, 1951. - 710 с.

23. Трапезников В.А. Задачи технических наук в развитии автоматического управления и технически средств автоматизации / В.А. Трапезников // Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации. Пленарные заседания. - Москва : изд. АН СССР, 1957. - С. 38-85.

24. Добрынин Е.М. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении / Е.М. Добрынин. - Москва : Машгиз, 1960. - 304 с.

25. Коротков В.П. Основы метрологии и точности механизмов приборов / В.П. Коротков, Б.А. Тайц. - Москва : Машгиз, 1961. - 144 с.

26. Кнеллер В.Ю. Измерение и контроль / В.Ю. Кнеллер // Измерительная техника. - 1963. - №3 - С. 1-4.

27. Вершинин И.И. Автоматический контроль / И.И. Вершинин, А.Л. Верцайзер, В.М. Яковлев. - Москва : Энергия, 1964. - 144 с.

28. Романов В.А. Автоматизация типовых производственных процессов / В.А. Романов. - Москва : Энергия, 1964. - 288 с.

29. Клейман В.А. Статистические методы регулирования и контроля качества / В.А. Клейман. - Москва : Изд.стандартов, 1966. - 116 с.

30. Блинов И.Н. Автоматический контроль систем управления / И.Н. Блинов, Д.В. Гаснаров, А.В. Мозгалевский. - Ленинград : Энергия, 1968. - 152 с.

31. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы / М.П. Цапенко. - Москва : Энергия, 1974. - 320 с.

32. Беляев Ю.К. Вероятностные методы выборочного контроля / Ю.К. Беляев. - Москва : Наука, 1975. - 408 с.

33. Энциклопедия кибернетики [в 4 т.Т1]. - Киев : Изд. Укр. Сов. Энциклопедия, 1975. - 608 с.

34. Справочник разработчика АСУ / под ред. Н.П. Федоренко и В.В. Корибоного. - Москва : Экономика, 1978. - 584 с.

35. Контроль – гарантия качества / под ред. Х. Лили [перевод с нем.]. - Москва : Изд. Стандартов, 1969. - 272 с.

36. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование / И.М. Яглом. - Москва : Советское радио, 1968. - 400 с.

References

1. Kontrol kachestva produktiv v mashinostroenii / pod red. A.E. Artresa. - Moskva : Izd-vo Standartov, 1974. - 448 s.
2. Elektricheskie metodyi avtomaticheskogo kontrolya / pod red. K.B. Karandeeva. - Moskva : Energiya, 1965. - 384 s.
3. Tsyipkin Ya.Z. Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemah / Ya.Z. Tsyipkin. - Moskva : Nauka, 1968. - 400 s.
4. Bolyichevtsev A.D. Ob opredelenii osnovnykh ponyatiy tehnikeskogo kontrolya / A.D. Bolyichevtsev, I.M. Shenbrot // Izmeritelnaya tehnika. - 1984. - № 9. - S. 17-19.

5. Bolyichevtsev A.D. O metodologicheskikh osnovakh teorii kontrolya / A.D. Bolyichevtsev, M.P. Tsapenko, I.M. Shenbrot // Izmeritelnaya tehnika. - 1984. - №10. - S. 21-23.
6. Bolyichevtsev A.D. Metrologicheskoe obespechenie: ponyatie, termin, opredelenie / A.D. Bolyichevtsev, E.I. Vayhbrot, M.P. Tsapenko, I.M. Shenbrot // Izmeritelnaya tehnika. - 1988. - №4. - S. 55-57.
7. Bolyichevtsev A.D. O kategoriyaх metrologii i ih traktovkah / A.D. Bolyichevtsev // Izmeritelnaya tehnika. - 1990. - №5. - S. 69-70.
8. Osipova Yu.V. Teoriya kontrolya identichnosti / Yu.V. Osipova // Vestnik Moskovskogo un - ta. Seriya 18. Sotsiologiya i politologiya. - 2016. - №22(1) - S. 215 - 224.
9. Kogut M.S. Osnovi vzaemozaminnosti, standartizatsiyi, sertifikatsiyi, akreditatsiyi ta tekhichnol vimlyuvannya : pidruchnik / M.S. Kogut. - Lviv : Svit, 2010. - 528 s.
10. Bolyichevtsev A.D. Elementyi obschey teorii tehicheskogo kontrolya / A.D. Bolyichevtsev, L.A. Bolyichevtseva. - Kursk : Kursk. gos. tehn. un-t, 2010. - 212 s.
11. Dal V. Tolkoviy slovar zhivogo velikorusskogo yazyika [v 4 t.T2] / V. Dal. - Moskva : Rus. yaz., 1989. - 779 s.
12. Ushakov D.I. Tolkoviy slovar sovremennogo russkogo yazyika / pod red. N.F. Tatyanchenko. - Moskva : Alta-Press, 2005. - 1216 s.
13. Ozhegov S.I. Slovar russkogo yazyika / pod red. N.Yu. Shvedovoy; AN SSSR, In-t rus. yaz., 23-e izd.ispr. - Moskva : Rus. yaz., 1991. - 917 s.
14. Slovar sovremennogo russkogo literaturnogo yazyika / gl. red. S.G. Barhudarov. Moskva : Izd. AN SSSR, 1956. - 1918 s.
15. Bolshaya Sovetskaya Entsiklopediya [v 12 t.T4] Moskva : Izd. BSE, 1973. - 654 s.
16. Radford G.S. Kontrol kachestva v proizvodstve / G.S Radford [per. s angl.] - Moskva : Orga-metall, 1926. - 332 s.
17. Tehnicheskaya entsiklopediya / gl. red. L.K. Martezh. - Moskva : Aktsionernoe obschestvo «Sovetskaya entsiklopediya», 1930. - 928 s.
18. Zhuravlyov A.N. Osnovy kontrolya v motorostroenii / A.N. Zhuravlyov. - Moskva : Oborongiz, 1941. - 236 s.
19. Acherkan N.S. Statisticheskie metody kontrolya / N.S. Acherkan. Moskva : Mashgiz, 1946. - 138 s.
20. Trapeznikov V.A. Avtomaticheskii kontrol lineynykh razmerov izdeliy / V.A. Trapeznikov. - Moskva : Oborongiz, 1949. - 432 s.
21. Temnikov F.E. Avtomaticheskii kontrol / F.E. Temnikov. - Moskva : VNITO poligrafii i izdatelstv, 1949. - 120 s.
22. Entsiklopedicheskii slovar [v 4 t.T2]. - Moskva : Izd. BSA, 1951. - 710 s.
23. Trapeznikov V.A. Zadachi tehicheskikh nauk v razvitii avtomaticheskogo upravleniya i tehicheski sredstv avtomatizatsii / V.A. Trapeznikov // Sessiya AN SSSR po nauchnyim problemam avtomatizatsii. Plenarnye zasedaniya. - Moskva : izd. AN SSSR, 1957. - S. 38-85.
24. Dobryinin E.M. Pribory avtomaticheskogo kontrolya razmerov v mashinostroenii / E.M. Dobryinin. - Moskva : Mashgiz, 1960. - 304 s.
25. Korotkov V.P. Osnovy metrologii i tochnosti mehanizmov priborov / V.P. Korotkov, B.A. Tayts - Moskva : Mashgiz, 1961.- 144 s.
26. Kneller V.Yu. Izmerenie i kontrol / V.Yu. Kneller // Izmeritelnaya tehnika. - 1963. - #3 - S. 1-4.
27. Vershinin I.I. Avtomaticheskii kontrol / I.I. Vershinin, A.L. Vertsayzer, V.M. Yakovlev. - Moskva : Energiya, 1964. - 144 s.
28. Romanov V.A. Avtomatizatsiya tipovykh proizvodstvennykh protsessov / V.A. Romanov. - Moskva : Energiya, 1964. - 288 s.
29. Kleyman V.A. Statisticheskie metody regulirovaniya i kontrolya kachestva / V.A. Kleyman. - Moskva : Izd.standartov, 1966. - 116 s.
30. Blinov I.N. Avtomaticheskii kontrol sistem upravleniya / I.N. Blinov, D.V. Gasnarov, A.V. Mozgalevskiy. - Leningrad : Energiya, 1968. - 152 s.
31. Tsapenko M.P. Izmeritelnyye informatsionnyye sistemy / M.P. Tsapenko. - Moskva : Energiya, 1974. - 320 s.
32. Belyaev Yu.K. Veroyatnostnyye metody vyborochnogo kontrolya / Yu.K. Belyaev. - Moskva : Nauka, 1975. - 408 s.
33. Entsiklopediya kibernetiki [v 4 t.T1]. - Kiev : Izd. Ukr. Sov. Entsiklopediya, 1975. - 608 s.
34. Spravochnik razrabotchika ASU / pod.red. N.P. Fedorenko i V.V. Koribonogo. - Moskva : Ekonomika, 1978. - 584 s.
35. Kontrol – garantiya kachestva / pod red. H. Lili [perevod s nem.]. - Moskva : Izd. Standartov, 1969. - 272 s.
36. Yaglom I.M. Matematicheskie struktury i matematicheskoe modelirovanie/ I.M. Yaglom. - Moskva : Sovetskoe radio, 1968. - 400 s.

БЕРЕЗІН Л. М.

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-2672-6323>e-mail: lnb07@ukr.net

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ НА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ В'ЯЗАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ШКАРПЕТКОВИХ АВТОМАТІВ

В роботі наведено аналіз та узагальнення існуючих методів та способів оцінки надійності в детермінованій та ймовірнісній постановках на прикладі елементів в'язального механізму шкарпеткових автоматів, що сприяє математичній підтримці на різних етапах проектування автоматів. Використовувалися сучасні уявлення про втомлену надійність та довговічність критеріальних за розміром деталей, статистичні методи для аналізу умов навантаження та оцінки характеристик опору втомленості.

Ключові слова: надійність, в'язальна голка, клин, навантаженість, розрахункові рекомендації.

Leonid BEREZIN

Kyiv National University of Technologies and Design

SYSTEMATIZATION OF CALCULATIONS FOR THE RELIABILITY OF ELEMENTS OF KNITTING MECHANISMS OF SOCKS MACHINES

The paper covers a wide range of issues in terms of longevity and reliability, which are presented in the modern theory and practice of designing for elements of knitting systems of sock machines. The relevance of the work is confirmed by the current trend in the production and modernization of relatively small batches of machines, which requires a reduction in time and cost of design, primarily due to the calculation recommendations.

The analysis and generalizations concerning the choice of calculations on longevity in deterministic and reliability in probabilistic statements for details of difficult forms and limited in the sizes are offered, in particular knitting needles and malleable working surface of cams, which are characterized by random loads and variations of strength characteristics of materials.

The mathematical apparatus for the analysis of influence on fatigue longevity of needles of increase of speed parameters of the automatic machine and of constructive measures for reduction of loadings in pair of a needle and cams is presented. A complex approach is presented for knitting needles for the security of the given fatigue longevity using of the position of the dynamic analysis, calculation of the loading, mathematical statistics and the theory of probability, which allows to quickly evaluate the effectiveness of the proposals to constructive and technological solutions.

The dependences for the calculations of cams of different construction for fatigue strength in the probabilistic setting, which in comparison with traditional (according to the normalized factor of safety) a sufficient level of reliability while minimizing of size.

Specifics for cams with malleable working surface of equal reliability and with the provision of simultaneous beam and double cantilever deformations are presented.

Shown the expediency of using trapezoidal consoles of equal resistance and the algorithm for calculating the sizes of their root and end sections according to the coefficient of shape and a given deflection, which minimizes the length of the cam consoles.

The advantages of computer modeling by the finite element method are listed, primarily obtaining the final results with sufficient accuracy and convenience for analysis.

Keywords: reliability, knitting needle/rod element, cam, loading, calculation recommendations

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

ходження в Industry 4.0 на умовах цифрової трансформації потребує виробництва шкарпеткових автоматів із застосуванням комп'ютеризації, автоматизації та електроніки [1], що передусім забезпечує урізноманітнення технологічних можливостей, мінімізує тривалість зміни асортименту продукції за рисунком, розміром та переплетенням, реалізацію автоматичного закриття миску шкарпеток на автоматі без швейних операцій, підвищення точності та стабільності переміщень робочих органів, скороченню механічних складових автоматів. Останнє досягається інноваційними змінами в конструкціях приводів та інших механізмів автоматів. Наприклад, використання крокових двигунів, що спрощує реалізацію реверсивного руху голкового циліндру [2], перехід на швидкодіючі актюатори для відбору голок [3], управління клинами, системою зміни щільності виробу, пневматичним переключенням нитководів тощо. Але поза межами кардинальних змін залишаються питання удосконалення найменш надійної складової автоматів - в'язального механізму.

Аналіз досліджень та публікацій

Оскільки надійність в'язальних механізмів автоматів лімітується втомленою довговічністю в'язальних голок, то роботи спрямовувалися переважно на дослідження конструкцій голок і клинів [4] та умов їх взаємодії з метою збільшення терміну служби [5]. Враховуючи, що на поточний момент виробництво голок повністю відійшло до закордонних компаній (Groz-Beckert, Daehan, Organ, Samsung та інші), а якість їх продукції гармонізується до вимог міжнародних стандартів ISO [6], то орієнтацію на удосконалення голок вважаємо безперспективною.

По суті конструктивні інновації в парі голка-клин зводяться до зміни клинів та в'язальних систем в цілому. До найбільш поширених рішень відносять:

- використання технології утворення петель в в'язальних системах із змінною відбійною площиною, що дозволяє підвищувати швидкісний режим за рахунок зменшення робочого ходу голок [7, 8];
- використання клинів з профільованими робочими поверхнями;
- використання клинів з пружно-демпфіруючими робочими поверхнями.

В першому випадку реалізація техніки в'язання із змінною відбійною площиною передбачає зустрічний рух голок та платин, як наприклад, в круглов'язальних машинах MV4-II [9] та "Реланит" компанії Mayer & Cie. Враховуючі значні ускладнення в конструкції в'язального механізму для відтворення складного (поступального та коливального) руху платин відносно голок та обмеженість в розмірах в'язальних систем в шкарпеткових автоматах, використання такого рішення є недоцільним.

Використання профілювання робочих поверхонь клинів за кривими забезпечує мінімізацію ударної взаємодії голок з поверхнею клину. Апроксимацію криволінійних профілів робочих поверхонь переважно виконують на основі окремих кривих (за параболою, циклоїдою, синусоїдою) або їх синтезом, а також за поліномом необхідного ступеня, де враховано переміщення, швидкості та прискорення п'яток голок в характерних точках профілю клину. Моделюванню процесу формування петлі з клинами за поліноміальними кривими присвячено дослідження [10], а інноваційні тенденції щодо конструювання наведені в [11]. Профільовані клини використовують в круглов'язальних машинах із замкненими замковими системами та при переробці більш міцної пряжі через збільшення кількості голок, які згинають нитку за однаковою дугою голкового циліндру. Враховуючи також зміну точки удару п'яток відібраних голок на криволінійних робочих поверхнях клинів шкарпеткових автоматів та можливість неконтрольованого вильоту голок при сході з клинів незамкнених замкових систем, цей підхід також є мало прийнятним.

Інший напрямок полягає в заміні клинів із жорсткою робочою поверхнею на клини з пружно - демпфіруючими поверхнями (надалі – податливими). Найбільш ефективні конструктивні рішення із зниження жорсткості робочої поверхні клинів представлені в [12]. Враховуючи переваги та недоліки наявних конструкцій клинів, технологічність їх виготовлення та функціональну надійність, пріоритет віддано закритим наскрізним пазам вздовж робочої поверхні клину.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: аналіз та узагальнення існуючих методів та способів оцінки надійності в детермінованій та ймовірнісній постановках стосовно елементів в'язального механізму шкарпеткових автоматів для сприяння математичній підтримці на різних етапах проектування автоматів.

Виклад основного матеріалу

Пропонуються підходи до проектних оцінок довговічності в'язальних голок та надійності клинів з податливими робочими поверхнями через аналіз ступеня впливу різних конструктивних та виробничих факторів з метою запобігання їх передчасних відмов. Параметром впливу, який опосередковано визначає втомлену надійність елементів в'язальної системи є їх навантаженість, яка характеризується силовим спектром (рівнями навантаження з відповідними числами циклів).

Динаміка взаємодії п'ятки голки з клинами представляється залежністю в зручній для аналізу замкнутій уніфікованій формі полінома виду [12]:

$$F_y = 12,55 - 5,164V_x - 0,460\alpha + 4,984 \cdot 10^3 m + 0,149 F_{on} - 1,142 \cdot 10^{-4} C_{np} + 4,395 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0,055 F_{on}^2 + 0,182 V_x \cdot \alpha + 6,892 \cdot 10^{-5} V_x \cdot C_{np} + 2,521 \cdot 10^{-6} \alpha \cdot C_{np}, \quad (1)$$

де $V_x = \frac{\pi n D}{60}$ – колова швидкість п'ятки голки при діаметрі D циліндричної гольниці та частоті її обертання n); α – кут нахилу робочої поверхні клину до горизонталі; m та C_{np} – маса та приведена жорсткість голки в зоні взаємодії з клином (через складність обчислення, C_{np} визначали за частотними характеристиками осцилограм навантаження); F_{on} – сила опору руху голки в пазу циліндру (створюється спеціально для унеможливлення самовільного опускання голок вздовж голкового пазу при незамкнених замкових каналах в шкарпеткових автоматах).

Враховуючи, що параметри V_x та F_{on} є заданими при проектуванні, як і величина маси голки m стандартного виробництва, очевидно, що мінімізація ударних навантажень $F_{y_{max}}$ в системі голка - клин – паз циліндру передусім залежить від приведеної жорсткості C_{np} та кута α нахилу робочої поверхні клину.

Дослідження щодо впливу кутів нахилу робочих поверхонь клинів на довговічність голок шкарпеткових автоматів з урахуванням спадковості конструкцій в'язальних механізмів виконано в [12]. Застосовували рівняння Веллера із залежністю між еквівалентним напруженням $\sigma_{екк_i}$ в небезпечному перерізі голки і заданим ресурсом в числах циклів навантаження N_{p_i} виду:

$$\sigma_{екк1}^{m_N} N_{p1} = \sigma_{екк2}^{m_N} N_{p2}, \quad (2)$$

де m_N – параметр міцності, який враховує нахил кривої втомленості голок (при обрахунку використовували результати експлуатаційних спостережень та динамічного аналізу); $i=1, 2$ – індекси параметрів навантажених голок до та після зміни кутів нахилу поверхонь клинів.

Представлено алгоритми обчислення m_N , $\sigma_{екк_i}$, N_{p_i} та встановлено, що збереження циклічної довговічності голки при підвищенні частоти обертання циліндру $n_2 > n_1$ потребує зменшення напруження в небезпечному перерізі голки в $\sqrt[n_1/n_2]{}$ разів. Практична реалізація заявленого підходу дозволяє

отримувати розрахункове значення кута нахилу клину $\alpha_2 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\sqrt[m]{K_T K_n^{m+1}}}\right)$ за умовою заданого ресурсу

за втомленою міцністю гачка голки при коефіцієнтах зміни ресурсу $K_T = T_{p_2} / T_{p_1}$ та частоти обертання циліндру $K_n = n_2 / n_1$.

Практична реалізація заявленого підходу дозволяє приймати обґрунтовані рішення стосовно зміни кутів α_2 нахилу робочих поверхонь клинів при різних комбінаціях проектних вимог до швидкості та заданого ресурсу голки, а також оцінити варіанти зміни кількості клинів в системах та жорсткісних параметрів голок і клинів. Але, як показує досвід, варіювання кутами нахилу клинів суттєво залежить від допустимої протяжності в'язальних систем, яка є обмеженою в шкарпеткових автоматах. Очевидним також є доцільність використання цього спрощеного варіанту розрахунку на ранніх стадіях проектування при наявності даних експлуатаційних спостережень або стендових випробувань.

Оскільки голки відносять до критеріальних за розмірами деталей, розрахунки рекомендуються виконувати за регламентованою, попередньо заданою, довговічністю. В роботі [13] пропонується використовувати графічну залежність обмеженої границі втоми небезпечного перерізу гачка голки σ_{rN} від заданого числа циклів навантаження N_H . За основу беруться закон зміни і число відповідних циклів навантажень, а також параметри втоми голок, які відповідають умовам їх роботи, та результати силового аналізу і статистичних даних про ресурс голок до руйнування [13].

Наведені розрахунки дозволяють визначати довговічність голок в детермінованій постановці. Для переходу до розрахунків на втомлену міцність в ймовірнісному аспекті передусім необхідна інформація про статистичні характеристики опору втомленого руйнування натурних деталей [14], зокрема голок. Для визначення границі втоми гачка голки $\sigma_{-1\epsilon}$ за відповідним параметром матеріалу σ_{-1} використовують коефіцієнт

$$K = \left(\frac{k_\sigma}{k_{d\sigma}} + \frac{1}{k_{F\sigma}} - 1 \right) \frac{1}{k_v \cdot k_A}, \quad (3)$$

який враховує вплив конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів на опір втоми деталі за коефіцієнтами концентрації напружень k_σ та коефіцієнтами, що враховують вплив масштабового фактору $k_{d\sigma}$, чистоти поверхні $k_{F\sigma}$, анізотропії металу k_A та термообробки деталі k_v відповідно. Проте складність форм голок та несталість факторів впливу при їх виготовленні і експлуатації можуть привести до значних похибок визначення коефіцієнту K та відповідно $\sigma_{-1\epsilon}$. Але накопичення різнобічних відомостей стосовно в'язальних голок різних конструкцій, включно з даними експлуатаційних спостережень, залишає в подальшому перспективу його використання при модернізації в'язальних систем діючих автоматів.

Оцінка ймовірностей втомленого руйнування голок від числа циклів навантаження за функцією розподілу втомленої довговічності голок з урахуванням нерегулярності навантаження і лінійно напруженого стану реалізується в [12]. В алгоритм розрахунку введено визначення коефіцієнтів варіації границі втоми голки $\nu_{-1\epsilon}$ та її навантаження ν_a в умовах обмеженої інформації. В розрахунках деталей серійного виробництва, до яких безумовно відносяться голки, приймають $\nu_a = 0,15$, який домінує відносно $\nu_{-1\epsilon}$. Також проаналізовано вплив на функцію розподілу довговічності голок варіацій силових параметрів (при зниженні реальних для практики ν_a від 0,1 до 0,22 графік є більш пологим), що розширює можливості при проектуванні.

Очевидно, що розрахунки на довговічність в ймовірнісному аспекті потребують використання ймовірнісних критеріїв та отримання додаткової вхідної інформації, що значно ускладнює та подовжує проектування. Тому їх необхідно використовувати на заключних стадіях проектування, що не виключає можливий контроль заданої довговічності при заводських випробуваннях дослідних зразків та вибіркових, але систематичних спостережень серійних виробів на підприємствах.

Методологія проектування клинів з податливою робочою поверхнею за критерієм втоми зводиться до визначення раціональних геометричних параметрів при мінімізації напруження і забезпеченні допустимої деформації податливого елементу у відповідності до технологічних вимог в'язання, а також з урахуванням просторових обмежень. Очевидно, що саме комплексний розрахунок в ймовірнісній постановці доцільно виконувати у випадках унеможливлення забезпечення великих запасів міцності.

При такому підході [14] розрахункове напруження σ_a і $\sigma_{-1\kappa}$ розглядаються як незалежні випадкові величини з розподілом за нормальним законом, які кількісно задаються середніми значеннями $\bar{\sigma}_a$ і $\bar{\sigma}_{-1\kappa N}$ та переважно відповідними коефіцієнтами варіації ν_a і $\nu_{-1\kappa}$. Ймовірність безвідмовної роботи P за критерієм втомленої міцності визначалась як $\text{Вер}(\sigma_a < \sigma_{-1\kappa N})$, а числове значення P встановлювали за таблицею нормального розподілу в залежності від квантилю, який обчислюють за формулою:

$$u_p = - \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 \nu_{-1\kappa}^2 + \nu_a^2}}, \quad (4)$$

де $\bar{n} = \bar{\sigma}_{-1kN} / \sigma_a$ - коефіцієнт запасу міцності за середніми нормальними напруженнями.

Для забезпечення сталої надійності вздовж податливої робочої поверхні клину запропоновано розрахунок [15] поперечних розмірів грані за методом найменшого об'єму з урахуванням закону розподілу матеріалу. Вихідними даними для оберненої задачі є задана надійність $P_{зад}$, напруження в перерізах балки та властивості матеріалу з відповідними законами розподілу $p_1(\sigma_{amax})$ та $p_2(\sigma_{-1k})$.

Універсальний підхід до розрахунків клинів з податливим елементом складної форми, який забезпечує одночасну балкову і подвійну консольну деформації, розглянуто в [16]. Використання в дослідженні комп'ютерного моделювання за методом скінчених елементів дозволяє уникнути більшості припущень аналітичного розв'язку та спрощує розкриття статично невизначеної просторової конструкції з двома жорсткими закладеннями. При варіюванні допустимих геометричних параметрів пластини клину було визначено розподіли еквівалентних напружень за Мізесом та деформацій в небезпечному перерізі в зоні її закріплення. До суттєвих переваг також відноситься наочність кінцевих результатів.

Очевидним удосконаленням даної конструкції клину є використання консолей рівного опору згину за довжиною. Це дозволяє забезпечити мінімізацію їх довжини l при однакових напруженнях та прогинах в порівнянні з консолями сталих поперечних перерізів. Наведено обґрунтування вибору консолі зі сталою товщиною h та зменшенням її ширини $a(x)$ в напрямку до вільного кінця. Враховували складність профілювання та технологічність виготовлення інших типів консолей, наприклад в порівнянні з «констерою», для якої $a(x)h(x) = a(1)h(1) = const$, де $a(1)$ та $h(1)$ - геометричні параметри кореневого перерізу консолі в місці її закріплення.

Першочерговою умовою розрахунку слугує задана податливість C як відношення прогину вільного кінця консольної балки $v_k(0)$ до навантаження F , яке виражається в залежності від коефіцієнта форми за прогином $\delta_{vk} = \frac{v_k(0)}{v(0)}$, де $v_k(0)$ - максимальний прогин на кінці k -ої балки рівного опору та $v(0)$ - прогин балки з сталими розмірами, які відповідають h та $a(1)$ кореневого перерізу. Надалі ширину в кореновому перерізі консолі $a(1)$ визначали за умовами забезпечення заданої податливості та збереження міцності за формулою:

$$\sigma_{max} = \frac{3F}{l} \left(\frac{2E^2 C^2}{\delta_{vk}^2 a(1)} \right)^{1/3} \leq \sigma_{kp}, \quad (5)$$

а найменшу допустиму ширину a_{min} консолі – за умовою міцності по дотичним напруженням. Тоді задача проєктування трапецієвидної консольної балки зводиться до вибору раціонального відношення $c_k = \frac{a(0)}{a(1)}$, яке впливає на величину коефіцієнту форми за прогином δ_{vk} . Для визначення δ_{vk} запропоновано підбір формул в залежності від вимог до точності обрахунків, які отримували інтегруванням диференціальних рівнянь пружної лінії балок змінного поперечного перерізу та методом поперечних перерізів.

Очевидно, що зміною коефіцієнта форми за прогином δ_{vi} можна впливати на довжину консольних балок, що актуально при мінімізації розмірів клинів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропоновані результати систематизації та узагальнення щодо вибору методу розрахунку довговічності в детермінованій та надійності в імовірнісній постановках стосовно деталей складних форм та критеріальних за розмірами, зокрема в'язальних голок та податливих робочих поверхонь клинів, які характеризуються випадковістю навантажень і розсіянням характеристик міцності матеріалів. На вибір розрахунку деталей також впливає повнота вхідних даних та етап проєктування в'язального механізму.

Для голок представлено комплексний підхід по забезпеченню заданої втомленої довговічності, який дозволяє при незмінній конструкції голок оперативно оцінювати ефективність конструктивних та технологічних рішень щодо в'язального механізму з використанням положень динамічного аналізу, обчислення параметрів навантаженості, математичної статистики та теорії ймовірностей.

Наведено посилання на залежності для розрахунку надійності клинів різних конструкцій з податливими робочими поверхнями рівної міцності та із забезпеченням одночасної балкової та подвійної консольної деформацій. Показана доцільність використання трапецієвидних консолей та алгоритм обчислення розмірів їх кореневого і кінцевого перерізів за коефіцієнтом форми та заданим прогином. Перелічені переваги комп'ютерного моделювання за методом скінчених елементів, передусім отримання кінцевих результатів з достатньою точністю та зручністю для аналізу.

Література

1. Latest single cylinder sock & hosiery knitting machine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.knitting-industry.com/sock-knitting-single-cylinder/>.
2. Santoni. Socks-NT 50 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.santoni.com/en->

macchine-sheet.asp?idm=596.

3. Matrix technology for textile industry. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.matrix.to.it/pdf/textile_dep.pdf.

4. Basu M. The research of knitting process and the needle failures /M. Basu, V. Manolache // *Metalurgia International*. - 2010. - 15(4). - P.32-34.

5. Reza M.H. A study on causes of knitting machine stoppages and their impact on fabric production / M.H. Reza, M.K. Hossain // *European Scientific Journal*. - 2015. - 11(33). - P.262-269. – DOI: <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/6650>.

6. Groz-Beckert. Certificates.Quality Management System ISO9001 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.groz-beckert.com/en/certificates.html>.

7. Бахматов К.И. Влияние применения техники вязания с переменной отбойной плоскостью на число вязальных систем / К.И. Бахматов, Е.В. Анашкин // *Вестник СПГУТД*. – 1996. - №1. – С.28-34.

8. Iyer, C. Rundstricken. Theorie und Praxis der Maschentechnik / C. Iyer, B. Mammel, W. Schach. – Bamberg: Meisenbach, 1991. – 267 s.

9. Betriebsanleitung for Mayer & Cie –Rundstrickmaschine Type: “MV 4-II” –Mayer & Cie. GmbH, Albstadt, 1998. – 54 s.

10. Zhao C. Optimal design of computerized flat knitting machine cam curves based on UG and ANSYS / LS-DYNA / C. Zhao, G. Song, L. Xu//*Applied Mechanics and Materials*. – 2014. - 529. - P.410-414. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.529.410>.

11. A Global Library of Market Research Reports [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchcosmos.com/>

12. Березін Л.М. Оцінка довговічності та надійності в'язальних механізмів панчішно-шкарпеткових автоматів : монографія / Л.М. Березін. – К.: КНУТД, 2013. – 191 с.

13. Березін Л.М. Імовірнісний розрахунок довговічності селекторів по критерію втомленісної міцності/ Л.М. Березін // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. - 2006. - №3(29). - С.35-41.

14. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч.1,2 /В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский - К.: Наук. думка, 1987. - 1315с.

15. Березін Л. М. Розрахунок податливої грані клину панчішних автоматів за заданою рівно надійністю за критерієм міцності /Л.М. Березін // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. – 2013. - №3. - С.168-172.

16. Berezin L., Savchenko, K., Rubanka, M., Polishchuk, O., Oliinyk, O., and Rubanka, A. (2021). Modeling of the Elastic Plates of Non-Base Configurations for the Cams of Automatic Half-Hose Machines /L.Berezin, K. Savchenko, M. Rubanka, O. Polishchuk, O.Oliinyk, A.Rubanka// *Advances in Science and Technology Research Journal* – 2001 - 15(1). - P.92-98. - DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/130826>.

References

1. Latest single cylinder sock & hosiery knitting machine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.knittingindustry.com/sock-knitting-single-cylinder/>.

2. Santoni. Socks-HT 50 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.santoni.com/en-macchine-sheet.asp?idm=596>.

3. Matrix technology for textile industry. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.matrix.to.it/pdf/textile_dep.pdf.

4. Basu M. The research of knitting process and the needle failures /M. Basu, V. Manolache // *Metalurgia International*. - 2010. - 15(4). - P. 32-34.

5. Reza M.H. A study on causes of knitting machine stoppages and their impact on fabric production / M.H. Reza, M.K. Hossain // *European Scientific Journal*. - 2015. - 11(33). - P. 262-269. – DOI: <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/6650>

6. Groz-Beckert. Certificates.Quality Management System ISO9001 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.groz-beckert.com/en/certificates.html>.

7. Bakhmatov K.I. Vliyaniye primeneniya tekhniki vyazaniya s peremennoy otboynoy ploskost'yu na chislo vyazal'nykh sistem / K.I. Bakhmatov, Ye.V. Anashkin // *Vestnik SPGUTD*. – 1996. - №1. – С.28-34.

8. Iyer, C. Rundstricken. Theorie und Praxis der Maschentechnik / C. Iyer, B. Mammel, W. Schach. –Bamberg: Meisenbach, 1991. –267 s.

9. Betriebsanleitung for Mayer & Cie –Rundstrickmaschine Type: “MV 4-II” –Mayer & Cie. GmbH, Albstadt, 1998. – 54 s.

10. Zhao C. Optimal design of computerized flat knitting machine cam curves based on UG and ANSYS / LS-DYNA / C. Zhao, G. Song, L. Xu//*Applied Mechanics and Materials*. – 2014. - 529. - P. 410-414. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.529.410>.

11. 11. A Global Library of Market Research Reports [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchcosmos.com/>

12. Berezin L.M. Otsinka dovhovichnosti ta nadiynosti v yazal'nykh mekhanizmiv panchishno-shkarpetkovykh avtomativ: monohrafiya / L.M. Berezin. – К.: КНУТД, 2013. – 191 с.

13. Berezin L.M. Imovirnisnyy rozrakhunok dovhovichnosti selektoriv po kryteriyu vtomlenisnoyi mitsnosti/ L.M. Berezin // *Bulletin of Kiev National University of Technologies & Design. Technical sciences*. - 2006. - №3(29). - С.35-41.

14. Troshchenko V.T. Soprotivleniye ustalosti metallov i splovov: Spravochnik: v 2 t. / V.T. Troshchenko, L.A. Sosnovskiy. – К.: Naukova dumka, 1987. – Т. 2. -808 s.

15. Berezin L. M. Rozrakhunok podatlyvoy hrani klynu panchishnykh avtomativ za zadanoyu rivno nadiynistyu

16. za kryteriyem mitsnosti / L.M. Berezin // *Bulletin of Kiev National University of Technologies & Design. Technical sciences*. – 2013. – № 3. – С.169-172.

17. 16.Berezin L., Savchenko, K., Rubanka, M., Polishchuk, O., Oliinyk, O., and Rubanka, A. (2021). Modeling of the Elastic Plates of Non-Base Configurations for the Cams of Automatic Half-Hose Machines /L.Berezin, K. Savchenko, M. Rubanka, O. Polishchuk, O.Oliinyk, A.Rubanka// *Advances in Science and Technology Research Journal* – 2001 - 15(1). - P.92-98. - DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/130826>.

ГІРЕНКО Н. І.

Державний заклад «Луганський національний університет ім. Т.Шевченка»

<https://orcid.org/0000-0001-6854-8257>e-mail: girenko_ni@ukr.net

КРАМАРЕНКО Д. П.

Державний заклад «Луганський національний університет ім. Т.Шевченка»

<https://orcid.org/0000-0003-1353-686X>e-mail: kramarenko_dp@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ ТРИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ ЯК ОСНОВИ ДЛЯ ФАРШЕВОЇ МАСИ З М'ЯСОМ ПТИЦІ ТА РОСЛИННИМИ ГІДРОБІОНТАМИ

В роботі наведено результати експериментальних досліджень реологічних і фізико-хімічних властивостей дисперсних систем для створення фаршевої маси з м'ясом птиці та рослинними гідробіонтами. Отримано залежності основного реологічного показника для фаршевої системи - граничної напруги зсуву. Також отримані данні про вологозв'язуючу і жируутримуючу здатність трикомпонентної полідисперсної системи. Досліджено зміни зазначених показників від зміни співвідношення компонентів.

Ключові слова: дисперсна система, напруга зсуву, фаршева маса, реологічні властивості.

Nataliia HIRENKO, Dmytro KRAMARENKO

Luhansk Taras Shevchenko National University

RESEARCH OF DISPERSED THREE-COMPONENT SYSTEM AS A BASIS FOR STUFFED MASS WITH POULTRY MEAT AND VEGETABLE HYDROBIOTS

Proper nutrition of Ukrainians is one of the most important problems of today, which shapes the health and well-being of the nation as a whole. In a rational diet a special role is played by the creation of new, balanced in composition products that are enriched with deficient functional components - minerals, vitamins, dietary fiber. Analysis of the publications of domestic and foreign scientists shows the relevance of such a direction of creating new functional products as expanding the range of multicomponent stuffed mass with a variety of raw materials of animal and vegetable origin.

According to scientific studies, the value of yield strength (YS) in the case of a change in the moisture content of minced sausages by 1% changes by 10... 15%, while the numerical values of other properties (viscosity, elasticity) change slightly. Thus, yield strength is a parameter by which you can effectively control the quality characteristics of minced meat.

Fat retention capacity (FRC) is a technological characteristic that is important during all stages of the technological process of production of finished meat products and semi-finished products and is the ability of the system to adsorb fat balls on the surface and convert some fat into bound state. The ability of minced meat to bind moisture strongly depends on the degree of dispersion of the particles and the moisture-binding capacity (MBC).

According to theoretical studies, taking into account the traditional trends of Ukrainian cuisine, the authors chose the main mass components to create minced meat with poultry and vegetable hydrobiots, these were - minced chicken, boiled beans and onions.

The aim was to study an important rheological characteristic of minced meat - changes in the YS of dispersed systems, to create multicomponent stuffing. The aim of the study was also to determine the patterns of changes in MBC and FRC three-component model systems during the introduction of different concentrations of components.

The paper presents the results of experimental studies of rheological and physicochemical properties of dispersed systems for creating minced meat with poultry and plant aquatic organisms. The dependences of the main rheological indicator for the stuffing system - the yield strength. Data on the moisture-binding and fat-retention capacity of the three-component polydisperse system were also obtained. Changes of the specified indicators from change of a parity of components are investigated.

Keywords: disperse system, shear stress, forcemeat mass, rheological properties.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Повноцінне харчування українців – одна з найважливіших проблем сьогодення, яка формує здоров'я і добробут нації в цілому. У раціональному харчуванні особливу роль відіграє створення нових, збалансованих за складом продуктів, що збагачені дефіцитними функціональними компонентами – мінеральними речовинами, вітамінами, харчовими волокнами. У багатьох країнах світу збагачення харчових продуктів незамінними мікронутрієнтами є загальноприйнятою практикою, а в деяких із них обов'язкове, що закріплено законодавчими актами. Продукти функціонального харчування все активніше займають призначене їм місце в арсеналі засобів збереження здоров'я, профілактичної та лікувальної медицини [1].

Незважаючи на те, що останнім часом спостерігається збільшення кількості функціональних харчових продуктів в Україні, цей процес необхідно інтенсифікувати.

У зв'язку з цим надзвичайно важливого значення набуває розробка нових напрямів з удосконалення технології багатокомпонентних продуктів функціонального призначення з використанням дієтичних добавок різного походження, які мають відігравати як фортифікуючу, так і технологічну роль у складі продуктів. Це дозволить розширити асортимент спеціалізованих продуктів і більш раціонально використовувати ресурси харчової промисловості [2].

Аналіз досліджень та публікацій

Значний об'єм теоретичних і практичних досліджень по вивченню, вдосконаленню, розробленню та виробництву нових функціональних продуктів харчування виконано і відображено в наукових працях провідних учених України і країн близького та дальнього зарубіжжя: Г. І. Касьянова, М. І. Пересічного, Л. В. Капрельянца, К. Г. Іоргачевої, А. П. Левицького, Г. О. Сімахіної, К. В. Свідло, М. Г. Гапарова, А. Ф. Дороніна, F. Bellisle, A. T. Diplock, G. Hornstra, P. M. Verschuren та інших учених.

Аналіз публікацій вітчизняних і зарубіжних учених свідчить про актуальність такого напрямку створення нових функціональних продуктів, як розширення асортименту полікомпонентних фаршевих мас із різноманітною сировиною тваринного та рослинного походження. Використання гідробіонтів у складі фаршів для виробництва січених виробів дозволяє створювати продукти з високою харчовою й біологічною цінністю, збалансованим аміно- і жирнокислотним складом [3].

Уведення до складу фаршевих мас рослинних гідробіонтів дозволяє коригувати їх хімічний склад і збагатити функціональними інгредієнтами, яких у звичайних фаршевих масах недостатньо або вони відсутні зовсім (вітаміни А, D, Е, В₁, В₂, В₆, В₉, В₁₂, РР, С, фолієва кислота, кальцій, йод, селен та ін.).

У багатьох країнах вважається перспективним додаткове введення харчових волокон до складу продуктів харчування, що благотворно впливає на метаболізм вуглеводів у шлунково-кишковому тракті людини, запобігає розвитку онкологічних захворювань, а також стимулює діяльність серцево-судинної і травної систем [4].

Гранична напруга зсуву (ГНЗ) є значною технологічною характеристикою, яка визначає здатність напівфабрикатів до формування.

Як свідчать дослідження науковців, величина ГНЗ у разі зміни вологості ковбасних фаршів на 1% змінюється на 10...15%, тоді як числові значення інших властивостей (в'язкості, пружності) зазнають незначних змін. Аналогічне спостерігається під час змін у фарші вмісту жиру й ступеня подрібнення фаршу. Таким чином, ГНЗ є параметром, за допомогою якого можна ефективно контролювати якісні характеристики фаршу.

Жирутримуюча здатність (ЖУЗ) – технологічна характеристика, яка має важливе значення протягом всіх стадій технологічного процесу виробництва готових м'ясних виробів і напівфабрикатів та полягає в здатності системи адсорбувати кульки жиру на поверхні і перетворювати частину жиру в зв'язаний стан. ЖУЗ – параметр, що суттєво впливає на якісні характеристики напівфабрикатів з фаршу та готової продукції.

Властивості фаршу суттєво залежать від співвідношення між кількістю міцно й слабо зв'язаної вологи. Міцно зв'язана волога перебуває у вигляді сольватних оболонок, утворених навколо диспергованих часток. Молекули води в них певним чином орієнтовані, що приводить до підвищення міцності цих оболонок і деякої твердості системи в цілому. Тому збільшення частки міцно зв'язаної вологи при тому самому її загальному вмісті (тобто при зменшенні частки слабо зв'язаної вологи) приводить до поліпшення структурно-механічних властивостей у системі. Навпаки, збільшення частки слабо зв'язаної вологи, що утворює рухливе дисперсійне середовище, зменшує сили взаємодії між дисперсними частками й виявляє пластифікуючу дію на систему.

При недостатній здатності фаршу втримувати міцно зв'язану вологу відповідно зростає частка слабо зв'язаної вологи й частина її стає надлишковою, навіть якщо загальний зміст вологи в продукті не перевищує норми. Про кількість слабо зв'язаної вологи можна судити по волозі, що виділяється при пресуванні шматочка фаршу на фільтрувальному папері (під тиском) або по втратах вологи при термообробці.

Здатність фаршу міцно зв'язувати вологу залежить від ступеня дисперсності часток і вологозв'язуючої здатності його білкової частини.

Оскільки м'язові білки мають більш високу вологозв'язуючу здатність, ніж білки сполучної тканини, а жир воду не зв'язує, вологозв'язуюча здатність фаршу зменшується зі зниженням вмісту в ньому повноцінних м'язових білків та підвищенням кількості сполучної тканини та жиру. Поліпшити технологічні властивості фаршевих систем допомагає використання добавок, що можуть зв'язувати вологу. Вологозв'язуючу здатність фаршу (ВЗЗ) можна підвищити, використовуючи такі добавки, як борошно різного походження, крохмалі, гідроколоїди і ін. [5].

Знання основних реологічних показників, що формують структуру напівфабрикатів і готових кулінарних виробів, дозволяє правильно оцінити їх якість, своєчасно забезпечити контроль і регулювання технологічних процесів на різних стадіях виробництва [6].

За результатами теоретичних досліджень, з урахуванням традиційних напрямів української кухні ми обрали основні за масовою часткою компоненти для створення фаршевої маси з м'ясом птиці та рослинними гідробіонтами, це були – м'ясо куряче подрібнене, квасоля відварна та цибуля ріпчаста.

Обробку продуктів проводили наступними способами:

- цибулю зачищали і промивали;
- квасоллю білу промивали, відварювали при температурі 98...100°C та при гідромодулі 1:2 протягом 45...60 хвилин;
- перед змішуванням м'ясо птиці подрібнювали на м'ясорубці з діаметром отворів решітки 3 мм;
- змішування проводили протягом 10...12 хв. до рівномірного, за органолептичною оцінкою, розподілення компонентів.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження важливої реологічної характеристики фаршевих мас – зміни ГНЗ дисперсних систем, для створення полікомпонентних фаршевих мас. Метою дослідження також було визначити закономірності змін ВЗЗ і ЖУЗ трикомпонентних модельних систем під час введення різних концентрацій компонентів.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення мети було сплановано і проведено повнофакторні експерименти типу 2⁴. Планування матриці експерименту проводилося за методикою крутого сходження Бокса-Уілсона.

Визначення ГНЗ проводили за температури 22°C. Отримані дані обробляли за допомогою проблемно-орієнтованого пакету математичних розрахунків Mathcad на ПЕОМ. Попередні дослідження дво- та трикомпонентних дисперсних систем [7] свідчать, що зміна ГНЗ, ВЗЗ і ЖУЗ фаршевих систем має нелінійний характер. Тому апроксимацію експериментальних даних про зміну показників проводили поліномами другого ступеня. Модельну систему складали з трьох компонентів, змінювали кількість двох компонентів системи на двох рівнях, кількість третього компонента системи визначалась автоматично виходячи із рецептури на 100 г суміші. Графіки залежності ГНЗ, ВЗЗ і ЖУЗ дисперсної системи «м'ясо птиці – квасоля відварна – цибуля ріпчаста» систем від співвідношення компонентів наведено на рис. 1-3.

У дисперсній системі «м'ясо птиці – квасоля відварна – цибуля ріпчаста» (рис. 1) ГНЗ котлетного фаршу з м'яса птиці перевищує цей показник у цибулі ріпчастої на 78,01...88,20% і у квасолі на 11,23...13,76%. Тому збільшення відсотка цибулі в системі на 10% знижує ГНЗ системи на 27,67...32,44%, а відсотка квасолі на 10% – зменшує ГНЗ на 5,57...6,40%. За формою графіка можна зробити висновок про відсутність інтенсивного взаємного впливу компонентів системи на ГНЗ.

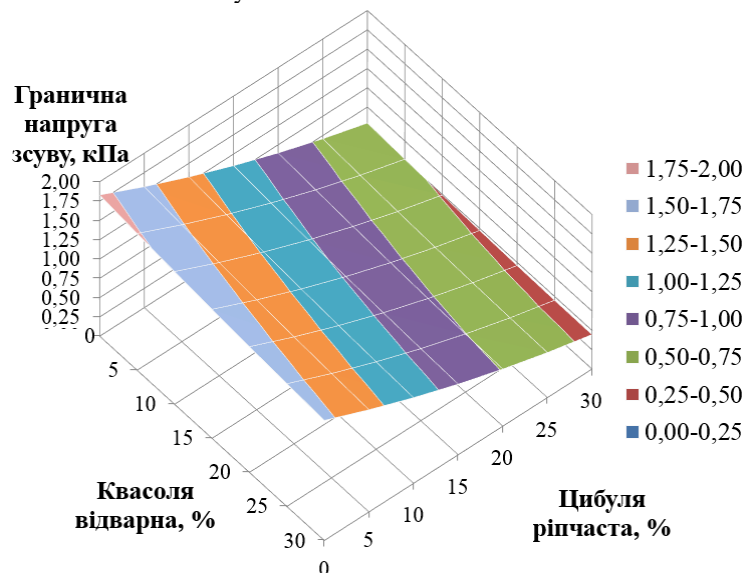


Рис. 1. Графіки залежності вмісту ГНЗ системи «м'ясо птиці – квасоля відварна – цибуля ріпчаста» від концентрації протертої квасолі та подрібненої цибулі

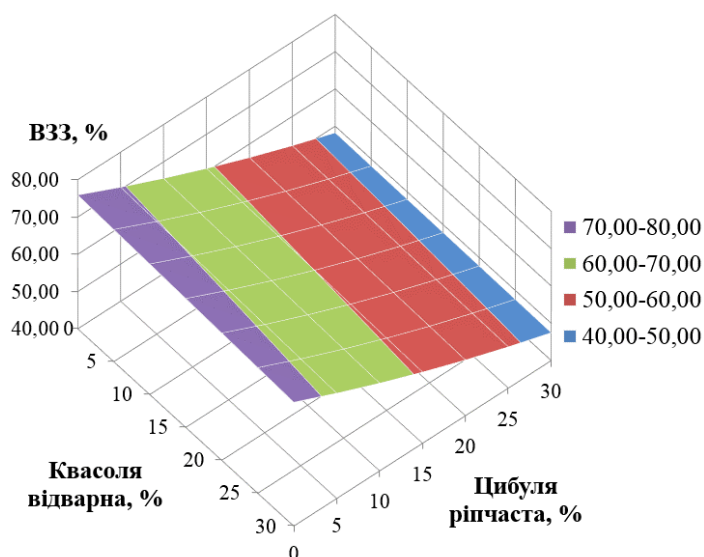


Рис. 2. Графіки залежності вмісту ВЗЗ системи «м'ясо птиці – квасоля відварна – цибуля ріпчаста» від концентрації протертої квасолі та подрібненої цибулі.

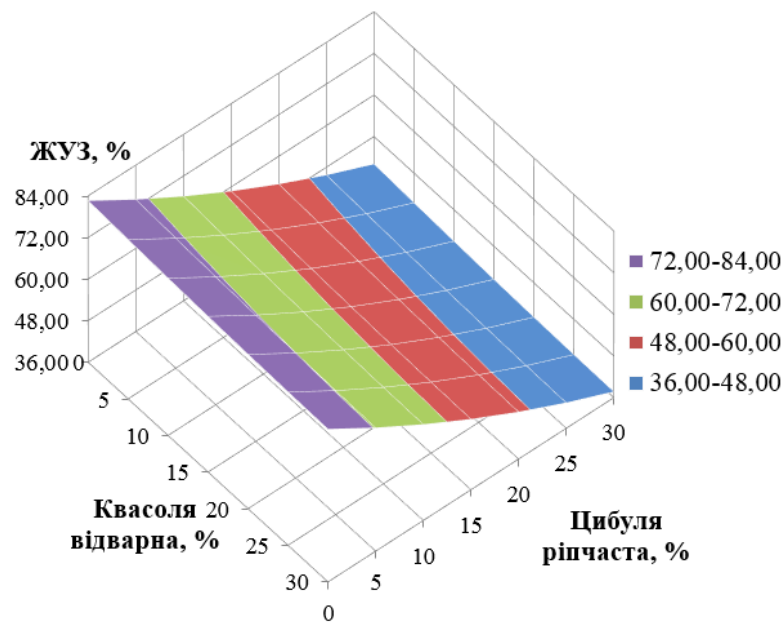


Рис. 3. Графіки залежності вмісту ЖУЗ системи «м'ясо птиці – квасоля відварна – цибуля ріпчаста» від концентрації протертої квасолі та подрібненої цибулі.

Це можна пояснити що білки м'яса і рослинні білки квасолі майже не взаємодіють, а цибуля містить не більше 2% білкових речовин.

За графіком залежності ВЗЗ системи від кількості компонентів (рис. 2) можна зробити висновок про незначний, але позитивний вплив підвищення кількості квасолі, так збільшення її на 10% відсотків підвищує ВЗЗ на 13,60...14,06%. Підвищення кількості цибулі на 10% незначно впливає на ВЗЗ – знижує її на 1,15...1,20%, що майже знаходиться в межах похибки експерименту. Спроможність квасолі підвищувати ВЗЗ можна пояснити великим вмістом крохмальних речовин в квасолі (до 25%), які здатні зв'язувати вологу системи, але після відварювання вони зв'язують достатньо невелику кількість води – 1,3...1,4% на 1% збільшення квасолі в системі.

Як можна бачити з рис. 3. підвищення долі квасолі відварної також позитивно відзначається на ЖУЗ системи, збільшення її долі на 10% підвищує цей показник на 19,9...21,4%, навпроти підвищення долі цибулі на 10% знижує ЖУЗ на 1,07...1,54%. Одночасне підвищення ВЗЗ і ЖУЗ з введенням квасолі можна пояснити тим, що ми розглядаємо трикомпонентну систему в якій приймає участь ще подрібнено м'ясо птиці, кількість якого на графіках встановлюється автоматично в відповідності для вмісту двох інших інгредієнтів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За результатом математичної обробки експериментальних даних були отримані математичні залежності, що описують зміни реологічних показників модельних систем.

Отримані дані і залежності змін функціонально-технологічної системи фаршевої маси були використані при розробці окремої технології напівфабрикату фаршу [8, 9]. Перспективою подальших досліджень у цьому напрямку є створення програмного продукту, який, ґрунтуючись на аналізі експериментальних даних та отриманих математичних залежностей, дозволить прогнозувати реологічні та фізико-хімічні показники фаршевих мас в залежності від співвідношення рецептурних компонентів.

Література

1. Ярошевич Т. С. Формування споживних властивостей пельменів та практичні аспекти їх ідентифікації / Т. С. Ярошевич // Товарознавчий вісник. – 2022. – Т. 1. – №. 15. – С. 138 – 147.
2. Чумак І. В. Основні тренди розвитку харчових інновацій у контексті українського та світового державотворення / І. В. Чумак // Вчені записки. – С. 11.
3. Геліх А. О. Дослідження показників якості січених виробів на основі прісноводних гідробіонтів та порошку гінґо білоба / А. О. Геліх // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені СЗ ґжицького. – 2019. – Т. 21. – №. 92 (2). – С. 36 – 41.
4. Li, L., Zhao, Y., Li, J., Ban, L., Yang, L., Wang, S., ... & Liu, H. The adhesion of the gut microbiota to insoluble dietary fiber from soy hulls promoted the proliferation of probiotics in vitro // LWT – Food Science and Technology. – 2022. – Volume 153. – P. 112560.
5. Крамаренко Д. П. Дослідження впливу гідролізату рибного колагену на жирутримувальну здатність модельної фаршевої системи / Д. П. Крамаренко, Н. І. Ґіренко, В. В. Дуб // Актуальні проблеми розвитку ресторанного, готельного та туристичного бізнесу в умовах світової інтеграції: досягнення та перспективи : міжнар. наук-практ. конф., 21 вересня 2017 р. : зб. матеріалів доп. – Х., 2017. – С. 122–123.

6. МакКенна Б. М. Структура и текстура пищевых продуктов. Продукты эмульсионной природы / пер. с англ. под науч. ред. Ю. Г. Базарновой. – СПб. : Профессия, 2008. – 480 с.
7. Крамаренко Д. П. Технологія молочно-білкових фаршів з використанням йодовмісної водоростевої добавки : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.16 / Крамаренко Дмитро Павлович. – Х., 2007. – 332 с.
8. Пат. на винахід 118317 Україна, МПК А23L 13/50. Спосіб одержання комбінованого фаршу з м'ясом птиці та рослинними гідробіонтами / Крамаренко Д. П., Гіренко Н. І., Дуб В. В.; заявник і патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. – № а201710405; заявл. 27.10.2017; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 6 с.
9. Крамаренко Д. П. Дослідження харчової і біологічної цінності нового комбінованого фаршу з м'ясом птиці та рослинними гідробіонтами / Д. П. Крамаренко, Н. І. Гіренко, О. О. Ревякіна // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – № 4(67). – С. 183 – 190.

References

1. Yaroshevych T. S. Formuvannya spozhyvnykh vlastyivostei pelmeniv ta praktychni aspekty yikh identyfikatsii / T. S. Yaroshevych // *Tovarnoznavchyi visnyk*. – 2022. – Т. 1. – №. 15. – С. 138 – 147.
2. Chumak I. V. Osnovni trendy rozvytku kharchovykh innovatsii u konteksti ukrainskoho ta svitovoho derzhavotvorennia / I. V. Chumak // *Vcheni zapysky*. – С. 11.
3. Helikh A. O. Doslidzhennia pokaznykiv yakosti sichenykh vyrobiv na osnovi prysnovodnykh hidrobiontiv ta poroshku hinkho biloba / A. O. Helikh // *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterinarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni SZ Gzhytskoho*. – 2019. – Т. 21. – №. 92 (2). – С. 36 – 41.
4. Li, L., Zhao, Y., Li, J., Ban, L., Yang, L., Wang, S., ... & Liu, H. The adhesion of the gut microbiota to insoluble dietary fiber from soy hulls promoted the proliferation of probiotics in vitro // *LWT – Food Science and Technology*. – 2022. – Volume 153. – P. 112560.
5. Kramarenko D. P. Doslidzhennia vplyvu hidrolizatu rybnoho kolahenu na zhyroutrymuvalnu zdattist modelnoi farshevoi systemy / D. P. Kramarenko, N. I. Hirenko, V. V. Dub // *Aktualni problemy rozvytku restorannoho, hotelnoho ta turystychnoho biznesu v umovakh svitovoi intehratsii: dosiagnennia ta perspektyvy : mizhnar. nauk-prakt. konf., 21 veresnia 2017 r. : zb. materialiv dop.* – Kh., 2017. – С. 122–123.
6. MakKenna B. M. Struktura i tekstura pishevykh produktov. Produkty emulsionnoj prirody / per. s angl. pod nach. red. Yu. G. Bazarnovoj. – SPb. : Professiya, 2008. – 480 s.
7. Kramarenko D. P. Tekhnolohiia molochno-bilkovykh farshiv z vykorystanniam yodovmisnoi vodorostevoi dobavky : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.18.16 / Kramarenko Dmytro Pavlovych. – Kh., 2007. – 332 s.
8. Pat. na vynakhid 118317 Ukraina, MPK A23L 13/50. Sposib odержання kombinovanoho farshu z miasom ptytsi ta roslynnyymi hidrobiontamy / Kramarenko D. P., Hirenko N. I., Dub V. V.; zaiavnyk i patentovlasnyk Khark. derzh. un-t kharch. ta torh. – № а201710405; zaiavl. 27.10.2017; opubl. 26.12.2018, Biul. № 24. 6 s.
9. Kramarenko D. P. Doslidzhennia kharchovoi i biolohichnoi tsinnosti novoho kombinovanoho farshu z miasom ptytsi ta roslynnyymi hidrobiontamy / D. P. Kramarenko, N. I. Hirenko, O. O. Reviakina // *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. – 2018. – № 4(67). – С. 183 – 190.

КАРМАЛІТА А. К.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4397-2988>e-mail: akarmalita89@gmail.com

ПУНДИК С. І.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5832-5527>e-mail: sera88p@gmail.com

ДРАПАК Г. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4908-0887>e-mail: g_drapak@i.ua

МЕЛЬНИК В. І.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1173-4638>e-mail: oks81mik@i.ua

АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ СПОСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОЛОЖЕННЯ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ВЗУТТЯ ПО ВЛАСТИВОСТЯХ ПОВЕРХОНЬ

У статті розглянуто способи вирішення проблеми орієнтації плоских деталей з різними властивостями поверхонь, які поступають на робочу позицію технологічного устаткування. Для правильної установки деталей на технологічну обробку потрібно виявити їх положення і, у випадку неправильного, переорієнтувати. Для цього запропоновано пристрої для контролю положення за фрикційними властивостями та асиметрією топографії поверхонь, а також їх конструктивні розрахунки.

Ключові слова: фрикційні властивості, топографія, валки, струмені повітря.

Anatolii KARMALITA, Serhii PUNDYK, Georgy DRAPAK, Vasiliy MELNIK
Khmelnytsky National University

ANALYSIS OF MECHANICAL METHODS OF CONTROLLING THE POSITION OF FLAT SHOE PARTS BY SURFACE PROPERTIES

The article considers ways to solve the problem of orientation of flat parts with different properties of surfaces that come to the working position of technological equipment. Mechanical methods of controlling the position of flat parts of footwear on the properties of surfaces are based on the use of asymmetry of their frictional properties or the magnitude of surface irregularities. In some cases, in the process of position control with the help of devices that implement these methods, it is possible to simultaneously transport the part to the working position of the process equipment or to the position of reorientation. Frictional properties of surfaces of any materials are characterized by the coefficient of friction, which depends on the elastic properties of the material, surface roughness, specific load and many other parameters that characterize the molecular interaction of surfaces in the contact zone. Most shoe materials have different frictional properties of the front and back surfaces. This provides the ability to automatically orient parts made of such materials on the basis of "front side - reverse side" using the differences in the frictional properties of the surfaces of the part. The use of rolls as sensors to control the position of flat shoe parts on the frictional properties of surfaces and simultaneous transportation of parts from the control position to the loading or reorientation position greatly simplifies the control operation, increases productivity and reliability of control devices. For correct installation of details on technological processing it is necessary to reveal their position and, in case of incorrect, to reorient. For this purpose, devices for position control on frictional properties and asymmetry of surface topography, as well as their design calculations are proposed.

Key words: frictional properties, topography, rolls, air jets.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Механічні способи контролю положення плоских деталей взуття по властивостях поверхонь засновані на використанні асиметрії їх фрикційних властивостей або величини нерівностей поверхонь. В окремому випадку в процесі контролю положення за допомогою пристроїв, що реалізують ці способи, можливо одночасне транспортування деталі на робочу позицію технологічного устаткування або на позицію переорієнтування.

Дослідженню фрикційних властивостей матеріалів, які застосовуються для деталей взуття, присвячено кілька робіт [1]. Аналізуючи їх, можна зробити висновок про те, що більшість взуттєвих матеріалів мають різні фрикційні властивості лицьової і виворітної поверхонь. Це передбачає можливість автоматичного орієнтування деталей з таких матеріалів за ознакою "лицьова сторона - виворітна сторона" з використанням відмінності фрикційних властивостей поверхонь деталі.

Виклад основного матеріалу

1. Контроль положення плоских деталей взуття по фрикційних властивостях поверхонь

Фрикційні властивості поверхонь будь-яких матеріалів характеризуються коефіцієнтом тертя, який залежить від пружних властивостей матеріалу, шорсткостей поверхонь, питомого навантаження і багатьох інших параметрів, що характеризують молекулярну взаємодію поверхонь у зоні контакту.

На рис.1 зображена схема контролю положення плоских деталей взуття по фрикційних властивостях поверхонь за допомогою двох фрикційних валків [2].

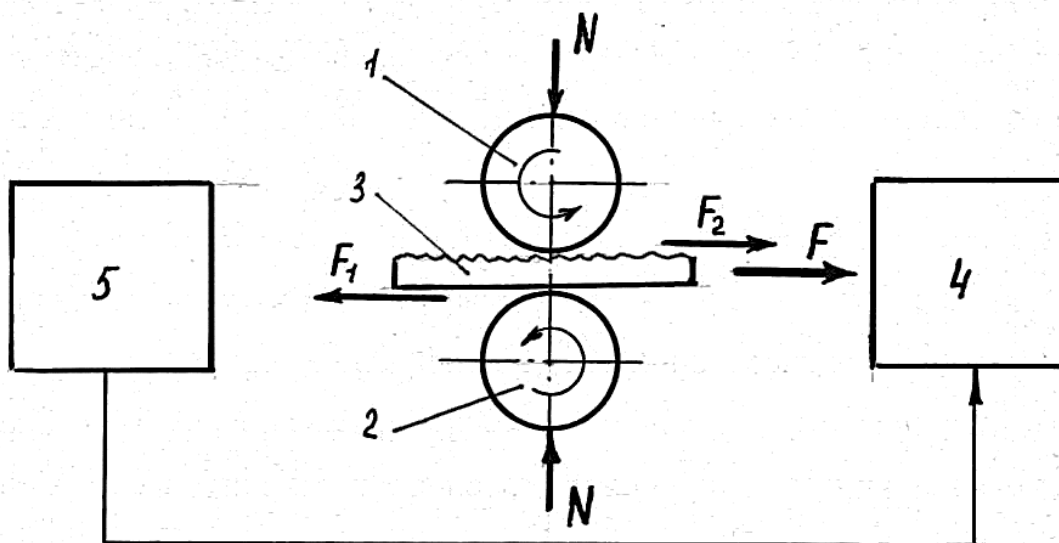


Рис.1. Схема контролю положення плоских деталей взуття по фрикційних властивостях поверхонь

На схемі представлені однакові валки 1 і 2, контрольована деталь 3, позиція завантаження 4 і позиція переорієнтування 5.

Контроль здійснюється в такий спосіб. Плоску деталь, що має асиметрію фрикційних властивостей поверхонь, поміщують між контролюючими валками з однакового матеріалу, що мають однакову шорсткість поверхонь, однаковий діаметр і обертаються в одну сторону. Потім валки притискають до протилежних поверхонь деталі. При цьому, якщо фрикційні властивості поверхонь деталі будуть різними, то, відповідно, будуть різними по величині і сили тертя F_1 і F_2 між деталлю й валками. У результаті деталь буде переміщатися тим валком, який контактує з поверхнею з більшою силою тертя.

Таким чином, у процесі контролю положення деталей переміщається з позиції контролю на позицію завантаження в технологічне обладнання або на позицію переорієнтування залежно від її вихідного положення.

При цьому зусилля переміщення деталі, у випадку $F_2 > F_1$

$$F = F_2 + F_1 = N(f_2 - f_1) \quad (1)$$

де N - зусилля притиснення валків,

f_1, f_2 - коефіцієнти тертя між валками й поверхнями деталі.

Головними факторами, за інших рівних умов, що впливають на ефективність контролю даним способом, є матеріал валків і зусилля притиснення валків.

Розрахунки пристроїв для контролю, що реалізують цей спосіб, не викликає більших труднощів, тому що фрикційні властивості взуттєвих матеріалів, а також матеріалів для валків досить повно вивчені.

Застосування валків як датчиків контролю положення плоских деталей взуття по фрикційних властивостях поверхонь і одночасного транспортування деталей з позиції контролю на позицію завантаження або переорієнтації значно спрощує операцію контролю, підвищує продуктивність і надійність контролюючих пристроїв.

2. Контроль положення плоских деталей взуття по асиметрії топографії поверхонь

Багато натуральних і штучних матеріалів, які використовуються у взуттєвому виробництві, крім інших відмінностей, мають різні нерівності (різну топографію), а також різну ворсистість на лицьовий і виворотній поверхнях, які можуть бути природними, створюватися штучно з декоративною або іншою спеціальною метою в процесі обробки [1].

Відмінність полягає у величині нерівностей і ворсу, їх розташуванню на поверхнях, а також у їхніх пружних властивостях.

Це створює можливість здійснити контроль положення плоских деталей взуття по властивостях поверхонь за допомогою способів, заснованих на використанні зазначених ознак.

2.1 Контроль положення плоских деталей взуття за допомогою струменів повітря

На рис.2 зображена схема контролю положення плоских деталей взуття по асиметрії нерівностей і ворсистості поверхонь за допомогою струменів повітря [3].

На схемі представлено дві пневматичні камери 1, встановлені на платформі 2, що мають патрубки 3 для приєднання до системи подачі стисненого повітря. У стінці кожної камери, зверненої до протилежної камери (яку далі будемо називати несучою поверхнею камери), виконані рівномірно розподілені по всій її поверхні отвори (сопла) 4, осі яких розташовані під однаковим кутом до поверхні стінки. При цьому осі отворів однієї камери паралельні осям отворів іншої камери і суми площ отворів у стінках камер рівні між собою.

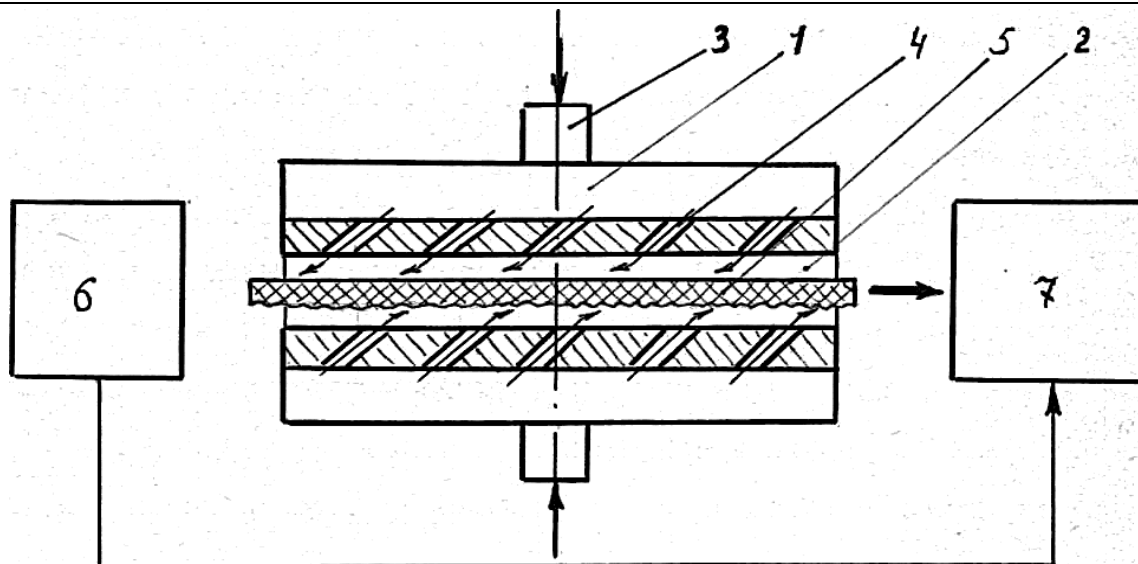


Рис.2. Схема контролю положення плоских деталей взуття по асиметрії шорсткості поверхонь за допомогою струменів повітря

Усі зазначені вимоги для розташування і розмірів отворів необхідні для створення рівнозначних умов впливу струменів повітря на протилежні поверхні деталі 5.

Контроль здійснюється в такий спосіб. Підлягаюча контролю деталь 5 встановлюється своїм найменшим розміром (ребром) на платформі 2 між двома камерами 1. Стиснене повітря через патрубки 3 подається в камери й виходить звідти через отвори 4, діючи на поверхні деталі.

Схема дії складових сил від впливу повітряного струменя на плоску деталь у початковий момент контролю, коли деталь перекриває всі сопла, показана на рис.3.

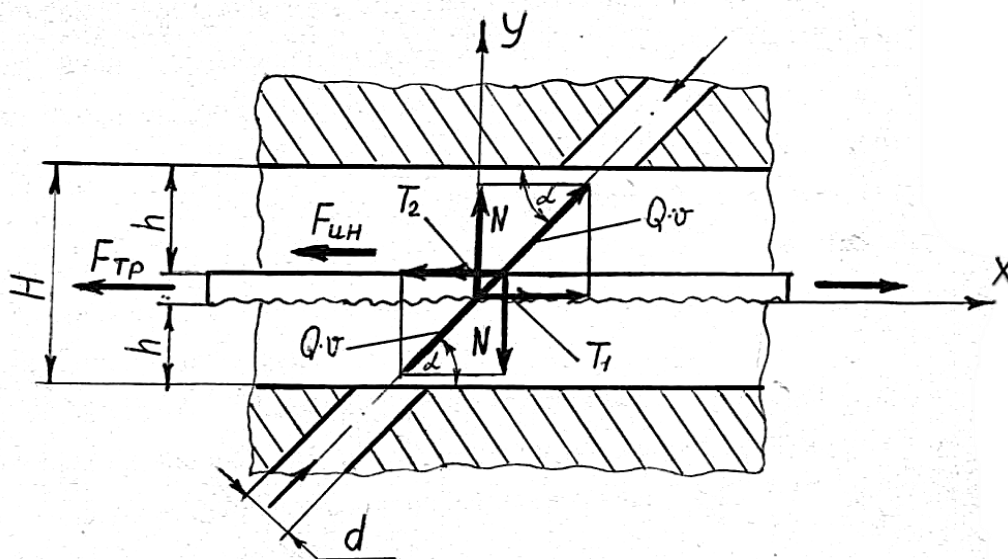


Рис.3. Схема сил, що діють на плоску деталь у процесі контролю положення по властивостях поверхонь за допомогою струменів повітря сторони в різних кількостях

Якщо струмінь повітря діє на деталь і спрямований під деяким кутом α до її поверхні, то силу дії її можна розкласти на дві складові: у напрямку нормалі до поверхні деталі N і уздовж її поверхні T . Тут слід помітити, що при зустрічі струменя повітря з поверхнею деталі під кутом $\alpha \neq 90^\circ$ повітря розтікається по поверхні деталі в усі

Кількість стікаючого в тому чи іншому напрямку повітря залежить від багатьох факторів і, насамперед від кута нахилу сопла α , зазору h між поверхнею деталі і несучою поверхнею камери і величини нерівностей поверхні. Тому силу T слід розглядати як результуючу сил, однакових по природі з нею і спрямованих у різні сторони. Сила T виконує роль рушійної сили в напрямку транспортування.

Сила N сприяє створенню зазору h між деталлю й несучою поверхнею камери.

Застосовуючи закон про кількість руху, сили N і T можна визначити з виразів:

$$N_1 = N_2 = Q \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

$$T_1 = C_1 \cdot Q \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

$$T_2 = C_2 \cdot Q \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

де Q - секундна масова витрата повітря,

ϑ - швидкість повітря,

C_1, C_2 - коефіцієнти, що характеризують нерівності поверхонь деталі.

Позначаючи $C = C_1 - C_2$ - коефіцієнт, що характеризує різницю топографічної характеристики поверхонь деталі, одержимо рівняння руху деталі в процесі контролю (рис.3):

$$cQ\vartheta \cos \alpha - F_{\text{тр}} = m\ddot{x}$$

де m - маса деталі;

$F_{\text{тр}}$ - сила тертя між деталлю і поверхнею основи пристрою для контролю.

Силами тертя поверхонь деталі об повітряну подушку можна знехтувати, тому що вони на два порядки менше чим сили тертя поверхні деталі об поверхню основи з будь-якого антифрикційного матеріалу.

Аналізуючи формули 2, 3, 4 можна висловити деякі міркування відносно теоретичного обґрунтування області оптимального кута нахилу сопла α . Зі зменшенням кута α збільшується сила T і одночасно зменшується сила N , збільшуються також габарити пристрою. Тому кут α необхідно брати як можна меншим з урахуванням величини сили N , яка повинна бути достатньою для втримання деталі у вертикальному положенні, щоб виключити її торкання несучих поверхонь камер.

При теоретичному обґрунтуванні оптимального діаметра сопла d і відстані між несучими поверхнями камер H необхідно враховувати умову бездросельного витікання повітря в системі "сопло-заслонка" [4]:

$$h \geq 0,25d$$

З іншого боку, зменшення діаметра сопла d за умови збереження сумарної площі сопел несучих поверхонь камер, веде до збільшення кількості сопел, а отже, зменшенню кроку між ними. Ця обставина повинна забезпечити більш рівномірне поле тиску в системі "несуча поверхня камери-деталь", що має істотне значення для м'яких деталей.

Рекомендується довжину сопла (товщину стінки камери) брати зі співвідношення:

$$l = d$$

При цій умові струмінь повітря на виході із сопла заповнює весь перетин. Більшу довжину брати не рекомендується, тому що до місцевих опорів у входу в сопло додаються втрати на тертя в каналі сопла.

Зі схеми сил (рисунк.3) зусилля переміщення в початковий його момент можна записати у вигляді:

$$T > F_{\text{тр}} + F_{\text{ін}} \quad (5)$$

або:

$$cQ\vartheta \cos \alpha > mgf + \frac{d^2 x}{dt^2} m \quad (6)$$

де $F_{\text{ін}}$ - сила інерції,

$F_{\text{тр}}$ - сила тертя між деталлю і поверхнею платформи,

f - коефіцієнт тертя,

m - маса деталі,

$\frac{d^2 x}{dt^2}$ - прискорення.

Силами тертя поверхонь деталі об повітряну подушку можна зневажити, тому що вони на два порядки менше сили тертя поверхні деталі об поверхню платформи з будь-якого антифрикційного матеріалу [5].

Експериментально були визначені коефіцієнти C , що характеризують відмінність у топографічних характеристиках поверхонь деяких деталей взуття з найпоширеніших матеріалів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Промислові роботи займають все більшу частку в технічному оснащенні підприємств легкої промисловості. Більша частина з них це не адаптивні програмні роботи, які працюють по жорсткій програмі. Менша частина це адаптивні роботи, які мають сенсорні захвати. Якщо для програмних робіт необхідне обов'язкове впорядкування середовища об'єктів обробки то для адаптивних потрібні сенсорні захвати, які будуть розпізнавати положення тих же об'єктів. Як в першому так і в другому випадку необхідно створити системи для контролю положення об'єктів роботизації.

2. Задачі орієнтування включають в себе елементи проблеми розпізнавання об'єктів, а саме розпізнавання положення об'єктів по відношенню до робочих органів технологічних машин чи захватів промислових робіт

3. Більшість плоских деталей взуття мають асиметрію фрикційних властивостей і величини нерівності поверхонь, що забезпечило можливість створення механічних способів контролю положення за властивостями поверхонь, які відрізняються простотою конструкції і надійністю в роботі.

Література

1. Коновал В. П., Гаркавенко С. С. Довідник взуттєвика: Київ: Лібра, 2005, С. 80–98.
2. Способ контроля положения плоских деталей обуви по фрикционным свойствам поверхности: пат. 3411335 СССР: МПК А43D 1/00. №1057000; заявл. 1982.03.18; опубл. 1983.11.30, 2 с.
3. Способ подачи деталей обуви с различной шероховатостью поверхности на технологическую обработку: пат. 3411334 СССР: МПК А43D 111/00. №1063378; заявл. 1982.03.18; опубл. 1983.12.30, 3 с.
4. Брюханов, О. Н., Коробко В. И., Мелик-Аракелян А. Т. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики : учебн. Москва, ИНФРА-М, 2005. 254 с.
5. Закалов, О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах : навч. посіб. Тернопіль, Видавництво ТНТУ ім. І.Пулля, 2011. 322 с.

References

1. Konoval V. P., Harkavenko S. S. Dovidnyk vzuttyevyka: Kyiv: Libra, 2005, S. 80–98.
2. Sposob kontrolya polozheniya ploskikh detalej obuvi po frikcionnym svojstvam poverhnosti: pat. 3411335 SSSR: MPK A43D 1/00. №1057000; yayavl. 1982.03.18; opubl. 1983.11.30, 2 s.
3. Sposob podachi detalej obuvi s razlichnoj sherohovatostyu poverhnosti na tehnologicheskuyu obrabotku: pat. 3411334 SSSR: MPK A43D 111/00. №1063378; yayavl. 1982.03.18; opubl. 1983.12.30, 3 s.
4. Bryuhanov, O. N., Korobko V. I., Melik-Arakelyan A. T. Osnovy gidravliki, teplotehniki i aerodinamiki : uchebn. Moskva, INFRA-M, 2005. 254 s.
5. Zakalov, O. V., Zakalov I. O. Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh : navch. posib. Ternopil, Vydavnytstvo TNTU im. I.Puliia, 2011. 322 s.

СЛАВІНСЬКА А. Л.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0663-9422>e-mail: tksv@khnu.km.ua

МАТЮХ С. А.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9899-109X>e-mail: matuh@khmnu.edu.ua

МИЦА В. В.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5453-9787>e-mail: mitsa_vv@ukr.net

ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА ДЛЯ КУПАЛЬНОГО КОСТЮМА

Виконана нормативна регламентація технічного контролю трикотажних полотен для виготовлення купальних костюмів. Аналітично обґрунтована номенклатура показників якості за рівнем застосування: обов'язкові, додаткові, рекомендовані. Експериментально апробований диференційний метод оцінки якості трикотажного полотна.

Ключові слова: трикотажне полотно, купальний костюм, нормативна документація, показник якості, диференційний метод.

Alla SLAVINSKA, Serhii MATIUKH, Viktoriia MYTSA
Khmelnytskyi National University

DIFFERENTIAL METHOD OF QUALITY CONTROL OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF KNITTED FABRIC FOR BATHING SUIT

In order to ensure compliance of knitted fabrics to the established requirements of bathing suits, technical regulation of quality is considered. The normative regulation of technical control of knitted fabrics for the production of bathing suits is carried out. The option of normative documentation of examination of knitted fabrics for bathing suits is presented by a set of standards. The standards of the «Product Quality Indicators System» complex establish the nomenclature of mandatory and recommended indicators for assessing the level of product quality in various light industry industries. The choice of measurement methods and processing of measurement results is regulated by DSTU 2681-94. Analytically substantiated nomenclature of quality indicators by level of application: mandatory, additional, recommended. The differential method of estimating the quality of a knitted fabric has been experimentally tested. The selection of quality indicators for testing samples of knitted fabric is made taking into account the purpose and conditions of use of the product, analysis of consumer requirements and additional and recommended requirements. The differential method in the examination of group quality indicators is carried out by comparing the individual quality indicators of the evaluated canvas with the basic indicators of homogeneous products by purpose. The object of the research is knitted fabrics for bathing suits, made by double weaving of double-elastic bands (interlock) on two-font interlock circular knitting machines type I2108-28 of the Terrot class. According to the results of the experimental study of the recommended nomenclature of physical and mechanical quality indicators, the compliance of the knitted fabric of raw materials PE + PA with the requirements of the Standard for the manufacture of bathing suits was confirmed. The influence of classification features of knitted fabric on the variation of discontinuous elongation in the assessment of the elasticity of the material by quality indices is confirmed.

Keywords: knitted fabric, bathing suit, regulatory documentation, quality indicator, differential method.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Купальний костюм є спортивно-побутовим одягом сучасного споживача, промислове виробництво якого обумовлене інтенсивним розвитком індустрії водного відпочинку. Глобальна конкуренція продукції масового виробництва підвищила інтерес до якості відповідності установленим технічним параметрам за принципом взаємозамінності та задоволення потреб споживачів за придатністю до використання.

Конкурентоспроможні вироби індивідуального вжитку і новітні технології створюються і впроваджуються на тих підприємствах, де здійснюються інновації та використовуються науково обґрунтовані засоби і методи оцінки якості на всіх етапах виробництва. Головною ідеєю концепції якості у XXI сторіччі є задоволення потреб споживачів, що веде до забезпечення якості життя.

Аналіз досліджень та публікацій

Відповідно до ДСТУ ISO 9000-2015 «Основні положення та словник термінів» впливати на якість кінцевого результату можливо шляхом впливу на процеси, що його формують. Зокрема, на якість процесу виробництва впливає якість матеріалів, обладнання, технологій, рівень кваліфікації персоналу. Якість предметів праці (основні та допоміжні матеріали) та якість засобів праці (обладнання, оснащення, вимірювальні засоби) визначають якість виробництва. Зміна стратегії організації підвищення цінності якості, не обмежуючись традиційним підходом до зниження дефектності, розглянута в [1]. Використання інформаційних технологій в логістиці застосування масивів даних з виробництва купальних костюмів представлено в [2-3].

Перспективним напрямком у розвитку технологій комунікацій для інтеграції підприємства та його постачальників є застосування моделі прогнозування механічних властивостей матеріалів, виміряних в 3D віртуальному середовищі [4]. Комфортність купального костюма потребує вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів для перебування як у водному середовищі, так і на відкритому повітрі [5]. Соціальна визначеність орієнтації сучасного споживача на креативність матеріалів в пропозиціях трендів моди визначає якість як основний чинник при виборі продукції у порівнянні з ціною [6].

Формулювання цілей статті

Мета дослідження – розробка диференційного методу експертизи якості фізико-механічних характеристик трикотажного полотна для купального костюма.

Виклад основного матеріалу

Для забезпечення відповідності трикотажного полотна до установлених вимог купального костюма використовують технічне регулювання якості. Регулятором конструктивного рішення як роздільних, так і суцільних купальників є розтяжність основного матеріалу. Використання диференційного методу врахування групи розтяжності еластичного трикотажного полотна забезпечує нормативну регламентацію проведення експертизи показників якості купального костюма.

Нормативна регламентація трикотажного полотна для виготовлення купальних костюмів

Застосування щорічних каталогів нормативних документів у сфері стандартизації через національний центр міжнародної інформаційної мережі ISONET WTO забезпечує достовірність поточної інформації про чинні нормативні документи. Національна система стандартизації України визначає номенклатуру об'єктів стандартів з поділом на шість груп, серед яких виділено методи випробування (аналізування) та метрологічне забезпечення [7]. Опція нормативної документації проведення експертизи трикотажних полотен для купальних костюмів представлена видом або комплексом стандартів. До основних або основоположних стандартів відносяться організаційно-методичні, загально технічні та термінологічні стандарти [8].

Організаційно-методичний комплекс стандартів під назвою «Система конструкторської документації» (СКД) встановлює правила та положення щодо порядку розроблення, оформлення й обігу конструкторської документації. В комплексі стандартів конструкторської документації важливе практичне значення має технічний опис (ТО) у формі експлуатаційного документа, що містить відомості про будову, принцип роботи і технічні характеристики виробу, необхідні для забезпечення правильної експлуатації.

В комплексі стандартів Системи технологічної документації (СТД) встановлені правила та положення щодо порядку розробки, комплектування, оформлення та обігу технологічної документації. До основоположних документів швейного і трикотажного виробництва відносяться паспорт куска матеріалу та конфекційна карта. Отже, паспорт куска матеріалу і конфекційна карта зі зразками матеріалів задіяні в плануванні, підготовці і організації виробництва з використанням загально-технічних стандартів. До засадничих складових технічного регулювання об'єктів стандартизації належать нормативне забезпечення, метрологічне забезпечення та технічний контроль.

Стандарти комплексу «Система показників якості продукції» встановлюють номенклатуру обов'язкових та рекомендованих показників для оцінки рівня якості виробів різних галузей легкої промисловості. Зокрема, для трикотажних виробів відповідно ДСТУ 3998-2000 [9] та ДСТУ 3045-95 [10].

Державний метрологічний контроль поширюється на вимірювання, результати яких використовують під час контролю якості і безпечності товарів народного споживання та обов'язкової сертифікації продукції. Нормативну основу державної метрологічної служби складають майже 70 національних та понад 300 міждержавних стандартів, які регламентують вимоги до засобів вимірювальної техніки. Вибір методів вимірювань та обробка результатів вимірювань регламентує ДСТУ 2681-94 [11]. Залежно від способу застосування засобів вимірювань розрізняють методи безпосередньої оцінки (абсолютні методи) та методи порівняння з мірою (відносні методи). При вимірювання методом безпосередньої оцінки шукане значення величини визначають безпосередньо на відліковому пристрої засобу вимірювання прямої дії, яке проградуєроване у відповідних одиницях. До цього методу належать вимірювання довжини та ширини текстильних матеріалів, розмірів шаблонів для досліджень, визначення розривного зусилля матеріалів, вимірювання маси тіл на циферблатних терезах тощо.

Диференційний метод, або різницевий застосовують при зважуванні матеріалів на аналітичних терезах. Метод заміщення заснований на заміні вимірювальної величини мірою з відомим значенням при визначенні зміни лінійних розмірів трикотажних полотен після мокрих обробок.

Залежно від способу отримання результату розрізняють вимірювання прямі та непрямі. Прямі вимірювання виконують безпосередньо за допомогою інструмента, зокрема, стандартна лінійка, товщиномір, мікрометр. Непрямі вимірювання можуть бути опосередковані, сукупні та сумісні. Більш високу точність забезпечують прямі методи вимірювання. Похибки засобів вимірювання та точність відліку регламентовані в стандартних методиках проведення інструментальних випробувань.

Формування номенклатури фізико-механічних показників якості трикотажного полотна

Відповідність властивостей продукції нормативним або іншим обґрунтованим вимогам в процесі експертизи визначають за допомогою показників якості. В ДСТУ 3998-2000 за класифікаційною ознакою

виділяють п'ять груп з поділом на 21 підгрупу. Вектор дослідження спрямований на показники призначення, які обумовлюють сферу застосування продукції і характеризують властивості матеріалів з визначенням ступені придатності виробу для виконання необхідних функцій. Практично діє дві системи оцінювання швейних виробів, до яких належить купальний костюм. Перша базується на вимогах стандартів для перевірки відповідності об'єкта певним нормативним документам. Друга система оцінює якість як відповідність характеристик виробу вимогам споживача. Перш за все, для формування номенклатури показників якості визначені стандартизовані обов'язкові та додаткові показники якості за ДСТУ 3045-95 (табл. 1). Підгрупа однорідної продукції – натільна білизна [12].

Таблиця 1

Номенклатура показників якості трикотажних полотен для купальних костюмів

Група показників		
1 Обов'язкові	2 Додаткові показники для добровільної сертифікації	3 Рекомендовані показники
Сировинний склад Ступінь тривкості пофарбування до фізико-хімічних впливів: поту хлорованої води морської води Зміна лінійних розмірів після мокрого оброблення Розривне зусилля Мінімально допустима розтяжність шва	Тривкість до стирання Товщина Розтяжність Залишкова деформація Ступінь тривкості пофарбування до фізико-хімічних впливів: світла прання Водовбиральність	Видовження на момент розірвання Розсувність Обсипальність Ступінь мерсеризації Поверхнева густина Лінійна густина пряжі Жорсткість

Вибір показників якості для випробування зразків трикотажного полотна виконано з урахуванням призначення та умов використання виробу, аналізу вимог споживачів та додаткових і рекомендованих вимог. В кожній групі вибрані показники, виділені жирним шрифтом.

Диференційний метод оцінки якості трикотажного полотна

Диференційний метод в експертизі групових показників якості здійснюється шляхом співставлення одиничних показників якості оцінюваного полотна з одиничним базовим показником однорідної продукції за призначенням:

$$Q_i = \frac{P_i}{P_0}, \quad (1)$$

де P_i – значення показника якості оцінюваного полотна;

P_0 – базове або унормоване значення показника якості.

Об'єктом дослідження служать трикотажні полотна для купальних костюмів, вироблені подвійним переплетенням дволастик (інтерлок) на двофонтурних інтерлочних круглов'язальних машинах типу I2108-28 класу компанії Terrot [13].

Купальний костюм є спортивно-побутовим одягом сучасного споживача. Його споживча цінність обумовлена двоосним розтягуванням, що забезпечує щільне облягання тіла, володіє невеликою масою і товщиною, незмінальністю, а також зручностями догляду – після прання швидко висихає і не потребує прасування. Волокнистий склад матеріалів для купального костюма представлено двома групами: поліамід РА, еластан ЕА – 86%, поліестер ПЕ, еластан ЕА – 14% [14]. Переважання капронових ниток еластика пояснюється підвищеною здатністю до розтягування, високою об'ємністю і достатньою пружністю. Поліестерні волокна і нитки мають низьку гігроскопічність, завдяки чому у вологому стані їх механічні властивості (міцність, розтягуваність, змінальність, стійкість до багатократних розтягів) практично не змінюються. При розтягуванні на 5-7% деформація ниток повністю зворотна, що забезпечує малозмінальність і збереження форми.

В якості базового показника поверхневої густини, за результатами дослідження [14], обрано поверхневу густину $175 \pm 5 \text{ г/м}^2$, що підтверджено статистичними характеристиками кривої розподілу в полотнах з переплетенням дволастик. Середньоарифметична величина $\bar{X} = 175 \pm 5 \text{ г/м}^2$; середньоквадратичне відхилення $S = 8,81$; коефіцієнт Пірсона $\chi^2 = 3,78$; коефіцієнт асиметрії $v_1 = 1,13$; коефіцієнт варіації $v_2 = 1,43$.

Оскільки форма купального костюма досягається перекосом у поєднанні з поперечним розтягом полотна, в показники включено деформаційні характеристики вздовж петельних рядків. Перелік показників якості для досліджень наведено в табл. 2.

Сировинний склад визначено випробуванням текстильних ниток на горіння. Встановлено, що полотно містить поєднання поліестерних волокон РЕ з еластаном ЕА, які можуть мати три варіанти відсоткових співвідношень: $70 \times 30 (\pm 5\%)$; $80 \times 20 (\pm 5\%)$; $90 \times 10 (\pm 5\%)$.

Схожість деформацій розтягування капронових і поліестерних волокон визначила вибір поверхневої густини матеріалів для поточного технічного контролю виробництва.

Середнє значення поверхневої густини M_s (формула 2) дорівнює $150,47 \text{ г/м}^2$ для трикотажних полотен. Середня товщина полотна $T_s = 0,302 \text{ мм}$, нормативна $0,300 \text{ мм}$. Результати статистичної обробки досліджень механічних властивостей трикотажного полотна наведені в табл. 3, 4.

Для оцінки розривних характеристик трикотажного полотна доцільно використовувати зразок у вигляді смужки розміром $50 \times 150 \text{ мм}$ для затискної довжини 50 мм .

Таблиця 2

Програма стандартних випробувань показників якості трикотажних полотен

Найменування показника	Прилади, ТУ, похибки	Вхідні параметри зразка	Методи вимірювання	
			Абсолютні (прямі)	Відносні (непрямі)
Товщина полотна	Товщиномір Shabe 0,10/0,01, навантаження 0,6 кг	10 різних місць зразка полотна	Лінійний (L), мм	-
Поверхнева густина	Терези ТВЕ-0,21-0,001	3 квадрати 200×200 мм	Маса (m_l), г	$M_s = \frac{25m}{n}$, г/м ² (2)
Розривне зусилля	РТ 250М-2 №148, затискна довжина 50 мм РТ-250М-2 №273, затискна довжина 100 мм	5 зразків вздовж петельних стовпчиків, 5 зразків вздовж петельних рядків 5 разів	Навантаження (P), даН	-
Видовження на момент розриву	РТ 250М-2 №148, затискна довжина 50 мм РТ-250М-2 №273, затискна довжина 100 мм	5 зразків 50×150 мм, 5 зразків 50×200 мм	Видовження (L), мм	-
Жорсткість	ПТ-2 №38 Терези ТВЕ-0,21-0,001	По 5 зразків 30×160 мм, вздовж петельних стовпчиків і рядків	Стріла прогину (f), мм Маса 5-ти зразків (m), г	Відносний прогин $f_0 = \frac{f_{сер}}{l}$ (3) Коефіцієнт А Умовна жорсткість (B_y), мкН·см ² , $B_y = 42046 \frac{m}{A}$ (4)
Водо-вбиральність	Терези ТВЕ-0,21-0,001 Сушильна шафа 2В-151	Зразки 50×200 мм, T=19°C; W=44%	Маса (m), г	Фактична вологість $W_\phi = \frac{m_e - m_c}{m_c}$ (5)
Зміна лінійних розмірів після прання	Пральна машина АЕС Lavamat 41380, пральний засіб «Formil»	Режим ручного прання, T=40°C; зразок 300×300 мм	Лінійний (L), мм	$Y_c = \frac{L_{до} - L_{після}}{L_{до}} \times 100$ (6)

Таблиця 3

Статистичні характеристики навантаження зразків

Вид розривної характеристики	Статистичні показники, \bar{X}_{ei} , \bar{X}_{si}						Коефіцієнт варіації $K_B = \frac{\bar{X}_{ei}}{\bar{X}_{oi}}$	
	Затискна довжина, мм				Базова			
	50		100					
	Експериментальні показники				Базові			
	стовпчик	рядок	стовпчик	рядок	стовпчик	рядок	стовпчик	рядок
Розривне навантаження, daH	16,88	30,9	-	27,0	27,6	33,2	0,61	0,93 0,81
Видовження на момент розірвання, мм	164,8	109,5	-	176,0	156,58	155,08	1,05	0,71 1,14

Таблиця 4

Розрахункові дані оцінювання жорсткості

1. Стріла прогину (кінцевий прогин), f , середнє значення, мм	Вздовж стовпчика	Вздовж рядка
	69,5	68,5
2. Відносний прогин, $f_0 = \frac{f_{сер}}{l} = \frac{f_{сер}}{70}$	0,993	0,979
3. Значення коефіцієнта А, як функції відносно прогину f_0 , згідно нормативної таблиці	288	190,24
4. Маса 5-ти зразків, г	3,77	3,73
5. Умовна жорсткість, B_y , мкН·см ²	$B_y = 42046 \frac{m}{A} = 530,4$	824,4

Значення умовної жорсткості підтверджує статистичні показники розтягу вздовж петельних стовпчиків з урахуванням базового типу полотна: волокнистий склад – ПЕ-80%, ЕА – 20%; поверхнева густина – 175 г/м².

Для оцінки водовбиральності фактичної вологості (за формулою 5) середні значення маси до і після висушування – $m_c=1,532$ г, $m_e=1,537$ г. $W_\phi=0,3\%$. Для сировинного складу ПЕ+ПА нормована вологість складає 0,2-0,4%. Зміна лінійних розмірів після прання визначена стандартним методом шляхом співставлення фіксованих лінійних розмірів на зразку 300X300 мм до і після прання. Зміна лінійних розмірів

після прання (за формулою 6): вздовж петельних стовпчиків: $Y_c = \frac{200,33 - 199,33}{200,33} \times 100 \approx 0,5\%$; вздовж

петельних рядків зміна лінійних розмірів відсутня.

Трикотажні полотна зі зміною лінійних розмірів менше 2% відносять до першої групи і характеризуються як незмінні. На практиці при проведенні бенчмаркінгу (зіставне оцінювання) частина значень відносних одиничних показників якості q_i може бути більшим, меншим або дорівнювати одиниці (табл. 5).

Таблиця 5

Показники якості трикотажного полотна дволастик ПЕ 80±5, ПА 20±5

Назва показника	Значення показника		Індекс якості, q_i		Коефіцієнт значущості, v_i	
	Фактичне P_i	Базове P_0	значення	позначення	позначення	Значення $\sum_{v_i=1}$
Товщина, мм	0,302	0,300	1,007	q_1	v_1	0,2
Поверхнева густина, г/м ²	150,47	175,0	0,86	q_2	v_2	0,16
Розривальне зусилля вздовж петельних стовпчиків, даН	16,88	27,6	0,61	q_3	v_3	0,12
Видовження на момент розриву вздовж петельних стовпчиків, мм	164,8	156,58	1,05	q_4	v_4	0,2
Жорсткість, мкН·см ²	530,4	870,0	0,61	q_5	v_5	0,12
Фактична вологість, %	0,33	0,4	0,83	q_6	v_6	0,16
Зміна лінійних розмірів після прання, %	0,5	2,0	0,25	q_7	v_7	0,04

Отримані індекси якості забезпечують графічну інтерпретацію рівня якості показників (рис. 1).

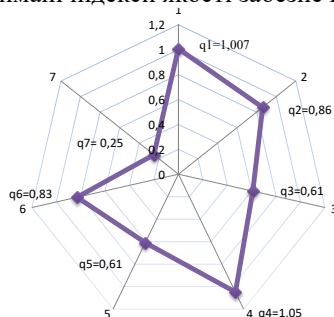


Рис. 1. Діаграма індексів якості трикотажного полотна для купального костюма

Середньозважений показник для середньоарифметичного розраховано за формулою:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n q_i v_i, \quad (7)$$

де q_i – відносний показник якості,
 v_i – коефіцієнт значущості i -го показника,
 n – число показників якості.

$$Q_{\text{ср}} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7 \approx 1,375.$$

Оскільки середньозважений показник якості більший за одиницю, полотно відповідає вимогам стандарту ДСТУ 3045-95.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За результатами експериментального дослідження рекомендованої номенклатури фізико-механічних показників якості підтверджена відповідність трикотажного полотна сировинного складу ПЕ+ПА вимогам Стандарту для виготовлення купального костюма. Підтверджено вплив класифікаційних ознак трикотажного полотна на варіацію розривного видовження в оцінці еластичності матеріалу за індексами якості.

Література

1. Єліна Т.В. Використання комп'ютерних засобів у прогнозуванні властивостей трикотажу / Т.В. Єліна, Л.Є. Галавська // Вісник Хмельницького нац. у-ту. Технічні науки. – 2020. – №5 (289). – С. 264-268.
2. Victoria's Secret. Women's Swimwear. – Режим доступу: <https://www.victoriasecret.com/us/vs/swimwear>.
3. Купальники. Fashion4you. – Режим доступу: <https://fashion4you.ua/c105-kupalniki-razdelnye/>.
4. Pei J., Fan J., Ashdown S. A novel optimization approach to minimize aggregate-fit-loss for improved breast sizing. Textile Research Journal, 2020, 90 (15-16), 1823-1836. <https://doi.org/10.1177/0040517519901318>.
5. Riabchykov M., Vilkov S., Nechipor S., Popova T. Two-dimensional studies of thermomechanical properties of textile materials for 3D formation. Vlakna a Textile (Fibres and Textiles), 2018, 25 (2), 87-92.
6. Juran J.M., Grina F.M. Juran's quality control handbook, 4th Edition. – New York: McGraw-Hill, 1988. – P 2.8.
7. Савчук Н.Г. Квалітологія швейного виробництва: підручник / Н.Г. Савчук, С.М. Березненко, М.П. Березненко – 2-е вид. – К.: Арістей, 2007. – 464 с.
8. Національна стандартизація. Правила побудови, викладання, оформлення та вимоги до змісту нормативних документів: ДСТУ 1.5-2015. – [Чинний від 2017-02-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 61 с. – (Національний стандарт України).
9. Матеріали та вироби текстильні, трикотажні, швейні та шкіряні. Терміни та визначення: ДСТУ 3998-2000. – [Чинний від 2001-07-01]. – К.: Держстандарт України, 2000. – 96 с. – (Державний стандарт України).
10. Полотна та вироби трикотажні, хутро штучне трикотажне. Класифікація та номенклатура

показників якості: ДСТУ 3045-95. – [Чинний від 1996-07-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 25 с. – (Державний стандарт України).

11. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. – [Чинний від 1995-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с. – (Державний стандарт України).

12. Вироби трикотажні білизняні для чоловіків і хлопчиків. Загальні технічні умови: ДСТУ ГОСТ 31408:2014. – [Чинний від 2014-11-01]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 19 с. – (Національний стандарт України).

13. Купальники. Модные тренды. Модница. – Режим доступу: <https://modnica.info/?cat=162/%20%3E>.

14. Зарічнюк, Л.І. Дослідження властивостей трикотажних полотен для купальників / Л. І. Зарічнюк, А.Л. Славінська, О. В. Верхняцька // Вісник Хмельницького нац. у-ту. Технічні науки. – 2009. – № 3. – С. 93-98.

References

1. Yelina T. Use of computer tools in forecasting the properties of knitwear / T.V. Yelina, L.E. Galavska // *Herald of Khmelnytskyi national university. Series: Technical sciences*. – 2020. – №5 (289). – С. 264-268.
2. Victoria's Secret. Women's Swimwear. – Access mode: <https://www.victoriassecret.com/us/vs/swimwear>.
3. Swimwear. Fashion4you. – Access mode: <https://fashion4you.ua/c105-kupalniki-razdelnye/>.
4. Pei J., Fan J., Ashdown S. A novel optimization approach to minimize aggregate-fit-loss for improved breast sizing. *Textile Research Journal*, 2020, 90 (15-16), 1823-1836. <https://doi.org/10.1177/0040517519901318>.
5. Riabchykov M., Vilkov S., Nechipor S., Popova T. Two-dimensional studies of thermomechanical properties of textile materials for 3D formation. *Vlakna a Textile (Fibres and Textiles)*, 2018, 25 (2), 87-92.
6. Juran J.M., Grina F.M. Juran's quality control handbook, 4th Edition. – New York: McGraw-Hill, 1988. – P 2.8.
7. Savchuk N.G. Kvalitologiya shvejnego virobniatva: pidruchnik / N.G. Savchuk, S.M. Bereznenko, M.P. Bereznenko – 2-e vid. – K.: Aristej, 2007. – 464 s.
8. National standardization. Rules of development, formulation and presentation of national normative documents: DSTU 1.5-2015. – [Chinnij vid 2017-02-01]. – K.: DP «UkrNDNC», 2016. – 61 s. – (Nacionalnij standart Ukraini).
9. Textile, knitted, sewing and leather materials and products. Terms and definitions: DSTU 3998-2000. – [Chinnij vid 2001-07-01]. – K.: Derzhstandart Ukraini, 2000. – 96 s. – (Derzhavnij standart Ukraini).
10. Knitted fabrics and garments, knitted fur for garments. Classification and quality characteristics nomenclature: DSTU 3045-95. – [Chinnij vid 1996-07-01]. – K.: Derzhstandart Ukraini, 1995. – 25 s. – (Derzhavnij standart Ukraini).
11. Metrology. Terms and definitions: DSTU 2681-94. – [Chinnij vid 1995-01-01]. – K.: Derzhstandart Ukraini, 1994. – 68 s. – (Derzhavnij standart Ukraini).
12. Knitted underwear for men and boys. General technical conditions: DSTU GOST 31408:2014. – [Chinnij vid 2014-11-01]. – K.: Derzhstandart Ukraini, 2014. – 19 s. – (Nacionalnij standart Ukraini).
13. Swimwear. Fashion trends. Fashionista. – Access mode: <https://modnica.info/?cat=162/%20%3E>.
14. Zarichnyuk, L.I. Research of properties of knitted fabrics for swimsuits v / L. I. Zarichnyuk, A. L. Slavinska, O. V. Verhnyacka // *Herald of Khmelnytskyi national university. Series: Technical sciences*. – 2009. – № 3. – S. 93-98.

БРЕДУН В. І.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

<https://orcid.org/0000-0002-8214-3878>e-mail: bvi37h@gmail.com

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЛОГІСТИКИ ТПВ У ПОЛТАВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

В роботі наведені результати досліджень прогнозування можливих тенденцій розвитку техніко-логістичної складової регіональної системи управління відходами як одного з можливих шляхів зниження ризиків реалізації РПУВ та підвищення ефективності системи поводження з відходами. Проаналізовано концептуальні положення перспективного розвитку системи управління відходами в Полтавській області, відповідність перспективним планам дорожньої мережі та основні тенденції формування сміттєвозного парку.

Ключові слова: система управління відходами, перспективи розвитку, логістична структура, дорожня мережа, сміттєвози.

Viktor BREDUN

Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL COMPONENT LOGISTICS OF MSW IN POLTAVA REGION

Purpose. The aim of the study is to ensure the effectiveness of the waste management system in Poltava region for the long term of the Regional Waste Management Plan in Poltava region for 2030 (RPUV) by analyzing the prospects of the logistics organization of waste management. Methodology. This paper uses methods of factor analysis with the study of causal relationships of the impact of conceptual provisions of the regional waste management system and some organizational and technological factors of its formation, as well as methods of inductive logic in forecasting trends. Results. It is established that the main conceptual principles of development of the waste management system of Poltava region provide for the introduction of a multi-stage scheme of solid waste transportation. The compliance of the road network with the goals of the RPUV is analyzed and the main problems are identified. A detailed analysis of the quality of the road network of the region allowed to identify the roads that pose the greatest threat to the implementation of the RPUV. The main tendencies of development of the park of specialized transport equipment in different perspective periods of realization of the plan and at different stages of the organization of transportations are established. Prospects for transport support of the first stage of transportation are formulated depending on the degree of urbanization of settlements. Originality. Based on the analysis of regional features of the system of solid waste management, the most probable directions of development of the technological component of the logistics structure of the regional system of solid waste management have been identified. Practical value. The results of the study reduce the risks of the implementation of the Regional Waste Management Plan and increase the efficiency of the solid waste management system.

Key words: waste management system, development prospects, logistics structure, road network, garbage trucks.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В рамках розроблення Регіонального плану управління відходами в Полтавській області до 2030 року [1] (далі – РПУВ або Регіональний план) є необхідність створення та забезпечення ефективного функціонування системи управління відходами у Полтавській області. Техніко-логістична складова системи управління відходами є основним базисом, що визначає ефективність всієї системи управління відходами. Особливої ваги логістичні питання набувають для періодів перспективного планування при впровадженні багатоетапних схем перевезень. Але, по-перше, перспективний період, визначений Регіональним планом, складає всього 9 років. По-друге, Регіональний план передбачає багатоваріантність реалізації. По-третє, існує ряд факторів, що впливають на структуру та перспективи розвитку логістичної складової системи управління відходами. Дані обставини обґрунтовують необхідність проведення аналізу можливих перспектив розвитку техніко-логістичної складової регіональної системи управління відходами як одного з можливих шляхів зниження ризиків реалізації РПУВ та підвищення ефективності системи поводження з відходами.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження забезпечення ефективності системи поводження з відходами у Полтавській області на перспективний період дії РПУВ шляхом аналізу перспектив логістичної організації управління відходами.

Аналіз останніх досліджень

Вперше застосування принципу стратегічного планування до управління твердими побутовими відходами (ТПВ) у Полтавській області було здійснено в рамках розробки європейськими експертами у 2016 році «Субрегіональної стратегії поводження з відходами для Полтавської області» [2], яка розпочала своє практичне впровадження з 2017 року в рамках реалізації «Комплексної програми поводження з твердими побутовими відходами у Полтавській області на період 2017–2021 роки» [3]. Даними документами закладено основні концептуальні положення організації системи збору і транспортування ТПВ. Більш

детально питання логістичного планування регіональної системи поводження з ТПВ було опрацьовано в [1]. На окремих місцевих рівнях розробка базових логістичних структур реалізовувалась через конкретні пілотні проекти, спрямовані, передусім, на розвиток системи збирання ТПВ від населення як унітарним, так і роздільного [4-7].

Виклад основного матеріалу

Процеси вивезення ТПВ розглядаються в сукупності з іншими суміжними процесами та явищами, які загалом утворюють систему управління ТПВ. Це дозволяє застосувати логістичні засади дослідження системи.

Завдання підвищення ефективності функціонування цієї системи не має простих і очевидних рішень і має базуватися на виключно науковому підході та обґрунтованій методичній основі. Традиційно розрізняють функції збирання та перевезення відходів. Як свідчить аналіз світового досвіду та вітчизняна практика, все розмаїття використовуваних систем видалення ТПВ можна звести до двох основних - прямої (одноетапної – збирання разом з вивезенням) та двоетапної (збирання, потім вивезення) з різними їх модифікаціями.

Одноетапна система видалення ТПВ використовується при їхньому прямому вивезенні від місць утворення та накопичення у вигляді змішаних відходів або селективно зібраних фракцій до об'єктів інфраструктури для подальшого поводження з ними з використанням спеціальних чи пристосованих транспортних технічних засобів - сміттєвозів різних типів та модифікацій, пристосованих для цих завдань вантажних автомобілів, тощо.

Двоетапна система видалення ТПВ включає збирання та транспортування відходів від місць їх утворення, збору (накопичення), збираючими сміттєвозами на СПС, де може проводитися не тільки тимчасове накопичення відходів і безпосередньо їх перевантаження в транспортні сміттєвози або іншу транспортну техніку, а й часткове сортування, підрізок із вилученням брухту, ущільнення та інші операції, та був, після перевантаження в великовантажну транспортну техніку (транспортні сміттєвози великої вантажопідйомності і місткості, пристосовані транспортні засоби), доставка до місць подальшого поводження з відходами.

Аналіз тенденцій розвитку систем поводження з ТПВ в нашій країні дозволяє зробити висновок про те, що вже в середньостроковій перспективі слід очікувати укрупнення об'єктів інфраструктури поводження з відходами (закриття дрібних полігонів та ліквідація санкціонованих звалищ поховання відходів із спорудженням великих сучасних міжмуніципальних полігонів з необхідною інфраструктурою, укрупнення сміттєпереробних та перевантажувальних комплексів та об'єктів з утилізації відходів).

Вже нині середня по Україні відстань вивезення ТПВ становить 20 км, однак у деяких великих містах із населенням понад 500 тис. жителів вона зростає до 45 км і більше. Близько 45% всіх ТПВ транспортуються на відстань 10-15 км, 40% - на 15-20 км, а 15% всіх відходів - більш ніж на 20 км. Дальність вивезення щорічно зростає в середньому на 1,5 км, а собівартість транспортування відповідно на 15-20 %.

Практика свідчить, що ефективний радіус вивезення відходів за одноетапною системою (прямий вивіз) становить 15-25 км. У разі дальності транспортування вище зазначеної величини потрібна організація двоетапної системи вивезення із застосуванням сміттєперевантажувальних станцій (СПС). Двоетапна система із застосуванням СПС при великій віддаленості місць утворення та збору відходів від місць тривалого поводження з ними ефективніша в економічному та екологічному відношенні. Відстані транспортування ТПВ на другому та третьому етапах передбаченим регіональним планом становлять від 20 до 120 км.

Все вище наведене означає збільшення обсягів магістральних перевезень, задіяння відповідної дорожньої інфраструктури (включаючи дороги найвищих категорій) та багатотонажного швидкісного магістрального транспорту.

За результатами аналізу дорожньої мережі області [8] встановлено, що кількість доріг та їх структура здатні забезпечити реалізацію Регіонального плану. Проте, якість покриття багатьох доріг є незадовільною, що створює певні загрози. Без проведення ремонтних робіт на цих шляхах, вони можуть бути зруйновані за декілька років. Це обумовлює вірогідну необхідність перепроєктування маршрутів другого етапу перевезень з прокладанням їх по дорогам задовільної якості. Однак, за такого варіанту відстань транспортування може збільшитись. Тому, нами за допомогою інформації з відкритих інтернет ресурсів проведено аналіз стану задіяних у маршрутах перевезень доріг, та встановлено ті з них, які потребують першочергових ремонтів: O1701001, O1702014, O1708108, O1710369, O1712158, O1712173, O1725350, C1171978, C170322, C171112, C171116, C172501, T1705.

Як при прямому, так і при двоетапному вивезенні ТПВ при роздільному зборі відходів необхідно застосовувати спеціалізовані транспортні засоби, що унеможливають перемішування окремо зібраних фракцій. Зазвичай при цьому використовується високопродуктивна транспортна техніка різної місткості та вантажопідйомності, спеціалізована для вивезення певних фракцій відходів, що дозволяє покращити техніко-економічні та екологічні характеристики всієї транспортної системи. З даних позицій економічно, технологічно та екологічно оправданою, і це підтверджується європейським досвідом (особливо скандинавських країн), є перспектива впровадження багатосекційних сміттєвозів [9]. Однак, така техніка на ринку України представлена дуже слабо.

В даний час для вивезення ТПВ використовуються різні сміттевози як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва, які відрізняються призначенням, місткістю, механізмами завантаження та вивантаження, спеціальним обладнанням для ущільнення відходів та характером процесу ущільнення.

Підбір транспорту для вивезення відходів багато чому визначається прийнятою системою збору. При передбаченій РПУВ багатоетапній схемі збору на кожному етапі існують свої специфічні вимоги. Основними логістично значимими є:

- споряджена маса автомобіля, яка має відповідати допустимому навантаженню на дорогу;
- габаритні параметри транспортного засобу (довжина, висота, ширина, радіус розвороту);
- параметри дорожньої інфраструктури (максимально дозволені навантаження на дорожнє полотно, обмеження по висоті, ширина вулиць, наявність розворотних майданчиків, мостів, тунелів, арок тощо);
- кількість і якість відходів, що утворюються;
- систему збору (змішана, неповна роздільна, повна роздільна, число фракцій, що окремо вивозяться).

Але найбільш важливим, актуальним для любого етапу технологічним параметром з точки зору логістичного планування є об'єм бункера сміттевоза. На підставі досвіду розробки логістичної складової регіональних і місцевих систем поводження з ТПВ [4-7] є можливим прогнозувати наступну структуру транспортного забезпечення логістичних процесів в перспективному періоді до 5 років:

1. Пріоритетним, особливо для населених пунктів з вузькими вулицями є сміттевози з заднім механізованим завантаженням.

2. Для організації першого етапу перевезень в містах використовуються переважно автомобілі з об'ємом бункера 11-22м³ та контейнеровози з об'ємом бункера 33-35м³.

3. В селищах міського типу - переважно автомобілі з об'ємом бункера 8-11м³. Рідше 15-18м³ та контейнеровози з об'ємом бункера 33-35м³. В окремих випадках, обумовлених архітектурно-планувальною структурою населеного пункту, доцільно використання автомобілі з об'ємом бункера 6м³.

4. Для обслуговування сільських населених пунктів в більшості територіальних громад в основному доцільно використовувати автомобілі з об'ємом бункера 8-11м³. В окремих випадках демографічна та географічна структура сільської частини громади може бути підставою для використання сміттевозів з об'ємом бункера 6 або 18-22м³.

5. Для обслуговування маршрутів 2 та 3 етапів перевезень необхідно використовувати спеціалізовані транспортні сміттевози в складі потужного швидкісного тягача та напівпричепа з об'ємом бункера 60м³ (в перспективі можливо й 90м³, але на ринку України такі пропозиції на даний час відсутні).

В перспективному періоді до 10 років з поширенням технологій роздільного збору доцільним є широке впровадження багатосекційних сміттевозів. Враховуючи селищно-сільський тип урбаністичної структури більшості громад та віковий склад населення, оптимальним є використання дво- або трисекційних сміттевозів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Основною стратегією розвитку логістичної структури системи управління відходами Полтавської області є поступове впровадження на протязі планового періоду багатоетапної схеми перевезень. Більшість доріг області категорій Т, О, С були побудовані ще за часів СРСР. Стан доріг цих категорій часто не відповідає вимогам організації магістральних перевезень, а структура дорожнього полотна не розрахована на рух багатотоннажних автомобілів. Тому, зараз існує проблема з якістю дорожнього покриття доріг зазначених категорій. Пропускна здатність існуючої дорожньої мережі при підтриманні її в задовільному стані забезпечує можливість збільшення навантаження транспортними сміттевозами. Максимально допустимі швидкості руху по параметру категорійності на всіх дорогах області відповідають технічним параметрам і проектним режимам руху спеціалізованого транспорту. Важливу роль у формуванні структури системи перевезень та транспортного забезпечення відіграють демографічні чинники. Існуючий модельний ряд спеціалізованого транспорту, який пропонують українські виробники не здатний повністю забезпечити реалізацію РПУВ, особливо в другому перспективному періоді, що обумовлює необхідність його розширення пріоритетно за рахунок введення нових моделей у відчизняне виробництво або шляхом закупівлі закордонної техніки.

Література

1. Регіональний план управління відходами у Полтавській області до 2030 року : проект [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalniy-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy>.

2. Субрегіональна стратегія поводження з твердими побутовими відходами для Полтавської області : проект «Реформа управління на сході України» «Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH» : представлено для Полтавської обласної державної адміністрації, GFA Consulting Group, січень 2016.

3. Комплексна програма поводження з твердими побутовими відходами у Полтавській області

на період 2017–2021 роки : затверджена рішенням сесії Полтавської обласної ради № 497 від 14.07.2017.

4. Схема санітарної очистки смт. Семенівка Семенівського району Полтавської області (угода 2019 року).

5. Схема санітарної очистки Гадяцької міської об'єднаної територіальної громади. Договір № 18/20 від 16.04.2020. Договір № 0104/20 від 16.04.2020.

6. «Схема санітарної очистки для м. Лохвиця та сіл Криниця, Васильки, Христанівка, Гаївщина Лохвицького району Полтавської області» (договір № 0150/19 від 02.05.2019).

7. Особливості логістичного планування систем поводження з ТПВ на прикладі міста Лохвиця / [О. Е. Ілляш, В. І. Бредун, В. І. Радко та ін.]. // Наук. журнал „Екологічна безпека”. – 2019. – №2. – С. 12–17.

8. Бредун В.І. Аналіз регіональної мережі автомобільних доріг як елементу системи управління відходами. Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки : наук. журн. / Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький: Вид-во ХНУ, №2 (295), 2021. – С.278-281. – ISSN 2307-5732 DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-278-281.

9. В.І. Бредун, В.В. Попельников, Аналіз технологічної ефективності логістичної схеми збору ТПВ, «Екологія. Довкілля. Енергозбереження»: Матеріали I Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», присвяченій 90-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (3-4 грудня 2020 року). – Полтава: НУПП, 2020. – С.241-243.

References

1. Rehionalnyi plan upravlinnia vidkhodamy u Poltavskii oblasti do 2030 roku : projekt [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/opriyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalny-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy>.

2. Subrehionalna stratehiia povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy dlia Poltavskoi oblasti : projekt «Reforma upravlinnia na skhodi Ukrainy» «Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) Gmbh» : predstavleno dlia Poltavskoi oblasnoi derzhavnoi administratsii, GFA Consulting Group, sichen 2016.

3. Kompleksna prohrama povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy u Poltavskii oblasti na period 2017–2021 roky : zatverdzhena rishenniam sesii Poltavskoi oblasnoi rady № 497 vid 14.07.2017.

4. Skhema sanitarnoi ochystky smt. Semenivka Semenivskoho raionu Poltavskoi oblasti (dohovir 2019 roku).

5. Skhema sanitarnoi ochystky Hadiatskoi miskoi obiednanoi terytorialnoi hromady. Dohovir № 18/20 vid 16.04.2020. Dohovir № 0104/20 vid 16.04.2020.

6. «Skhema sanitarnoi ochystky dlia m. Lohvytsia ta sil Krynytsia, Vasylyky, Khrystanivka, Haivshchyna Lohvytskoho raionu Poltavskoi oblasti» (dohovir № 0150/19 vid 02.05.2019).

7. Osoblyvosti lohistychnoho planuvannia system povodzhennia z TPV na prykladi mista Lohvytsia / [O. E. Illiash, V. I. Bredun, V. I. Radko ta in.]. // Nauk. zhurnal „Ekolohichna bezpeka”. – 2019. – №2. – S. 12–17.

8. Bredun V.I. Analiz rehionalnoi merezhi avtomobilnykh dorih yak elementu systemy upravlinnia vidkhodamy. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu : Tekhnichni nauky : nauk. zhurn. / Khmelnyts. nats. un-t. – Khmelnytskyi: Vyd-vo KhNU, №2 (295), 2021. – S.278-281. – ISSN 2307-5732 DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-278-281.

9. V.I. Bredun, V.V. Popelnykov, Analiz tekhnolohichnoi efektyvnosti lohistychnoi skhemy zboru TPV, «Ekolohiia. Dovkillia. Enerhozberezhennia»: Materialy I Vseukrainskii naukovo-praktychnii konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Ekolohiia. Dovkillia. Enerhozberezhennia», prysviachenii 90-richchiu Natsionalnoho universytetu «Poltavska politekhnika imeni Yuriia Kondratiuka» (3-4 hrudnia 2020 roku). – Poltava: NUPP, 2020. – S.241-243.

ГРИЦЮК П. М.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

<https://orcid.org/0000-0002-3683-4766>e-mail: p.m.hrytsiuk@nuwm.edu.ua

БАБИЧ Т. Ю.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

<https://orcid.org/0000-0001-6927-7313>e-mail: t.iu.babych@nuwm.edu.ua

КРАСЬКО Б. В.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

e-mail: krasko_ak21@nuwm.edu.ua

КЛАСИФІКАЦІЙНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ

Аналіз врожайності пшениці за останні 20 років показує, що врожайність у всіх областях України зростає. Це є результатом зростання інвестиційної привабливості галузі зерновиробництва та значних інвестицій, які надійшли у галузь. Однак, тенденція до зростання супроводжується значними коливаннями врожайності, причиною яких здебільшого є погодно-кліматичні фактори. Найбільш помітним є вплив кліматичних факторів для степових регіонів України. В роботі запропоновано класифікаційний підхід до прогнозування врожайності пшениці з врахуванням погодно-кліматичних факторів та використанням методів машинного навчання. Для побудови комп'ютерних моделей було використано набір даних врожайності пшениці у чотирьох областях степової зони України за період 2000 – 2021 роки та відповідні значення 12 метеофакторів. Числові значення врожайності були перетворені у бінарну змінну, яка набуває лише двох значень: «0» (низька врожайність) чи «1» (висока врожайність). Для моделювання бінарних даних використано probit- та logit-моделі, результуючі значення яких можуть трактуватися як імовірність значного перевищення врожайністю трендового значення. Точність побудованих моделей перевищує 80%.

Ключові слова: інвестиції, модель.

Petro HRYTSIUK, Tetiana BABYCH, Bohdan KRASKO
The National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

CLASSIFICATION METHODS OF THE YIELD FORECASTING

Analysis of wheat yields over the past 20 years shows that wheat yield are growing in all regions of Ukraine. This is a result of the growing investment attractiveness of the grain industry and the significant investments made in the industry. However, the upward trend is accompanied by significant fluctuations in wheat yields, which are mostly caused by weather and climatic factors. The most noticeable is the climatic factors influence for the steppe regions of Ukraine. The paper proposes a classification approach to forecasting wheat yield taking into account weather and climatic factors and the use of machine learning methods. A set of wheat yield data in four regions of the steppe zone of Ukraine for the period 2000-2021 and the corresponding values of 12 meteorological factors were used to build computer models. Cross-validation with division into 10 groups was used to build and test of models. Numerical values of wheat yield were converted into a binary variable, which acquires only two values: "0" (low yield) or "1" (high yield). If the value of wheat yield exceeding over the trend value is greater than the specified threshold value, the new value of binary variable is 1, otherwise the binary variable value is 0.

Two models are constructed to classify the excess of yield over the trend value, which are based on the regression logit and regression probit. The obtained model values can be interpreted as the probability of a significant excess of yield over the trend value. Both models provide high quality classification with a slight advantage of the logit model. The aggregate classification quality of both models exceeds 88%, which is a good result for such a complex task as modeling the dependence of yield on meteorological factors in a small sample.

Keywords: investing, model

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зернове виробництво є основою агропромислового комплексу України, визначає обсяги пропозиції та вартість основних видів продовольства. Надходження значних інвестицій в аграрне виробництво забезпечує стабільне зростання врожайності зернових. Впродовж останніх років Україна увійшла до групи провідних виробників та експортерів зерна. У 2021 році зібрано рекордний врожай зернових та зернобобових в розмірі 84 млн тон. Аграрний сектор формує близько 17 % валового внутрішнього продукту нашої держави, аграрний експорт становить майже 45 % від всіх валютних надходжень. Разом з тим, зерновиробництво є високо ризиковим виробництвом, ефективність якого у значній мірі залежить від кліматичних факторів. Для забезпечення стабільності зерновиробництва необхідно враховувати залежність врожайності від кліматичних факторів та мати адекватні моделі такої залежності.

Дискусійним моментом є критерій якості прогнозової моделі. Похибка прогнозу не може виступати таким критерієм, адже більш важливими є показники зростання/спадання врожайності та перевищення/недосягнення врожайністю середнього/трендового значення. Тому часто використовується критерій точності прогнозу, який будується на основі співвідношення кількості правильно передбачених напрямків зміни врожайності (приріст – спад) до загальної кількості прогнозів.

У даній роботі запропоновано класифікаційний підхід до прогнозування врожайності пшениці в областях степової зони України з використанням комп'ютерних моделей класифікації даних, та проведено порівняння ефективності використаних моделей.

Аналіз досліджень та публікацій

У роботі [Грицюк, Бачишина, 2016] здійснено аналіз впливу метеорологічних факторів на врожайність зернових культур в регіонах України. Відзначено, що вирішальне значення для майбутньої врожайності мають погодні умови квітня, травня і червня. Схожий висновок було отримано у дослідженні залежності врожайності пшениці від кліматичних факторів у Ірландії [Irish Journal of Agricultural Research. - Vol. 8, No. 3, Dec., 1969. pp. 349-357. - J. Lee and M. J. Connaughton. Effects of Weather on Wheat Yields]

В аналітичному огляді [Даніель Мюллер, Анне Юнгандreas, Фрідріх Кох та ін. Вплив кліматичних змін на виробництво пшениці в Україні. Німецько-український агрополітичний діалог. – Київ, 2016. – 45с.] проаналізовано оцінили вплив кліматичних змін на врожайність озимої пшениці на території усієї України та окремо у трьох чітко визначених екологічних зонах країни. Відзначено негативний вплив змін клімату на очікувані зміни врожайності зернових і, особливо, у степовому регіоні України.

У роботі Кернасюк Ю.В. Адаптація до кліматичних змін: економіка технологій поливу. – Економічний гектар. 03.06.2020. <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/17754-adaptatsiia-do-klimatichnykh-zmin-ekonomika-tekhnohii-polyvu.html> проаналізована економічна ефективність поливу з метою підвищення врожайності сільськогосподарських культур.

У роботі [О.О. Кривошеїн, Л.П. Однолеток, Л.П. Дзюба. Оцінка впливу погодних умов та організаційно-технологічних заходів на урожайність озимої пшениці за її кліматичним потенціалом. – Наукові праці УкрНДГМІ, 2016, Вип. 269. – с.151-158] використано поняття кліматичного потенціалу врожайності як прогностичної ознаки врожайності озимої пшениці.

У роботі [Кобченко Ю.Ф., Кобченко О.Ю., Резуненко В.А. Вплив погодних факторів на формування урожаю зернових культур у Харківській області. – Вісник Харківського національного університету. – 2014, №1098. – с.86-91] показано, що в умовах зони лісостепу вирішальний вплив на формування урожаю пшениці відіграє достатня кількість опадів. Цей же висновок підтверджено у роботі [Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. Damien Beillouin].

Проблемам трансформації зерновиробництва в контексті змін клімату присвячено праці вітчизняних та зарубіжних вчених серед яких: Л. Бачишина, У. Гофман, П. Грицюк, В. Данкевич, Т. Ільєнко, А. Кучер, О. Нечипоренко, А. Польовий, Л. Попитченко, Дж. Портер, Г. Робертс, А. Сохнич, Ю. Тараріко та ін.

У роботі [Kurt Heil, Anna Lehner and Urs Schmidhalter. Influence of Climate Conditions on the Temporal Development of Wheat Yields in a Long-Term Experiment in an Area with Pleistocene Loess. - Climate 2020, 8, 100, 17p. www.mdpi.com/journal/climate] було запропоновано використовувати залишки від тренду врожайності як індикатори впливу кліматичних міжрічних змін.

Прогнозування врожайності є складною задачею, суть якої визначається випадковим характером багатьох впливаючих факторів. Тому для вирішення цієї задачі доцільно застосовувати методи інтелектуального аналізу даних із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій. Останнім часом з'явилося декілька робіт такого спрямування [Beillouin D, Schauburger B, Bastos A, Ciais P, Makowski D. 2020 Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. Phil. Trans. R. Soc. B 375; Konduri V., Vandal T., Ganguly S., Ganguly A. Data science for weather impacts on crop yield. Front. Sustain. Food Syst., Vol. 4, May 2020]

Виклад основного матеріалу.

Аналіз динаміки врожайності пшениці в областях України.

Для аналізу та моделювання динаміки врожайності пшениці ми використали офіційні дані, отримані з урядового порталу Державної служби статистики України [21]. Аналіз динаміки врожайності в областях України за останні 20 років показує, що врожайність у всіх областях зростає. Зростання врожайності стало результатом зростання інвестиційної привабливості галузі зерновиробництва та значних інвестицій, які в результаті надійшли у галузь. В результаті покращилась насіннева база, зросла агротехнічна культура, триває розбудова логістичної мережі (елеватори, вагони-зерновози, порти). У 2021 році в Україні був отриманий рекордний врожай зернових та зернобобових – 84 млн тон. Однак, тенденція до зростання врожайності супроводжується значними коливаннями врожайності, причиною яких здебільшого є погоднокліматичні фактори. Ілюстрацією може слугувати динаміка врожайності озимої пшениці в Херсонській області (рис. 1). Величина відхилень від тренду прямо залежить від впливу кліматичних факторів, основним з яких є посухи (2003 та 2012 роки на рис. 1). Для оцінки залежності врожайності від кліматичних факторів ми пропонуємо використовувати критерій, який є сумою модулів відхилень врожайності y_i від трендових значень tr_i

$$S = \sum_{i=2000}^{2020} |y_i - tr_i|. \quad (1.1)$$

Розподіл областей за значенням кліматичного критерію представлений на рис. 2. Найбільше відчувають вплив кліматичного фактора області, які належать до степової зони – Херсонська, Одеська, Запорізька, Кіровоградська. Саме ці 4 області є об'єктом нашого наукового дослідження.

Для прогнозування врожайності використовують різні методи. Одним з найпростіших є метод екстраполяції лінійного тренду, який дозволяє отримати точковий прогноз врожайності. Більш поширеним є інтервальний прогноз, який дозволяє встановити рівень надійності прогнозування. Для побудови інтервального прогнозу врожайності необхідно перевірити гіпотезу про нормальний розподіл трендових перевищень

$$eps_t = y_t - tr_t. \quad (1.2)$$

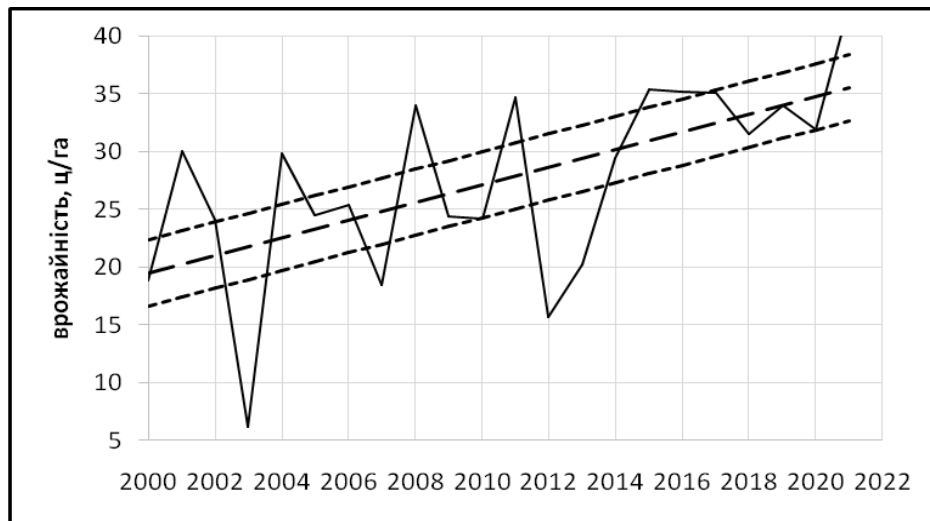


Рис. 1. Динаміка врожайності озимої пшениці у Херсонській області. Штрихова лінія – лінійний тренд. Пунктирні лінії – межі високої та низької врожайності.

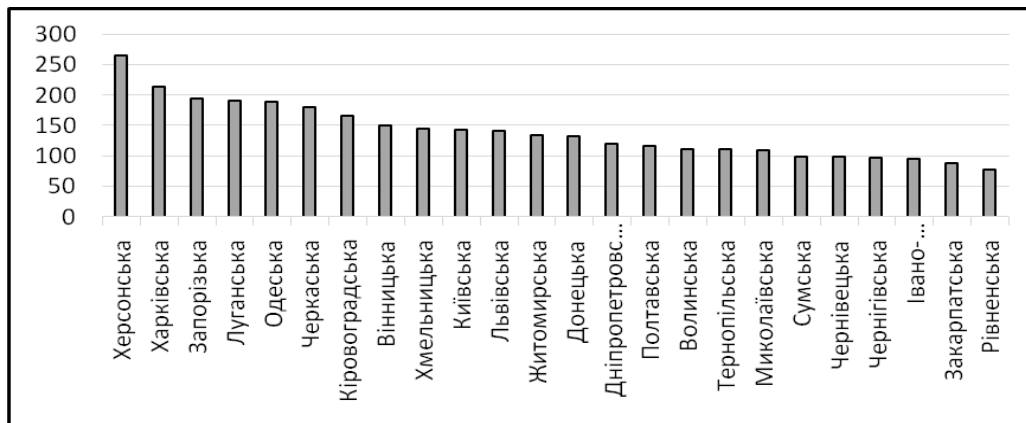


Рис. 2. Сортування областей за значенням критерію залежності врожайності від кліматичного фактора

Для перевірки гіпотези про нормальний розподіл трендових перевищень ми використали об'єднану вибірку трендових перевищень для чотирьох областей степової зони (88 значень). Гіпотеза про нормальний розподіл перевищень була підтверджена з використанням критерію Колмогорова-Смірнова та критерію Хі-квадрат Пірсона (рис. 3).

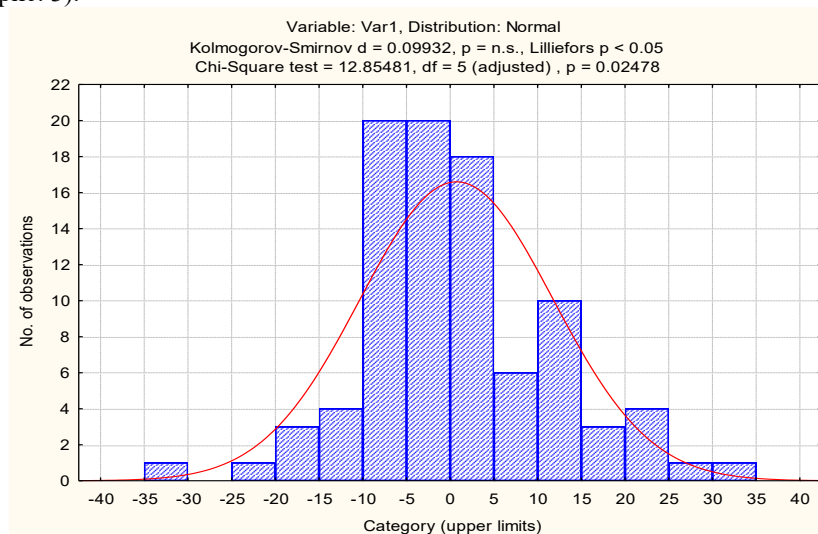


Рис. 3. Перевірка гіпотези про нормальний розподіл трендових перевищень врожайності. Об'єднана вибірка для Херсонської, Одеської, Кіровоградської та Запорізької областей. Дані за 2000 – 2021 роки.

Для вирішення багатьох проблем планування аграрного бізнесу не обов'язково мати точний прогноз

врожайності. Наприклад, для прийняття рішення щодо інвестування у конкретний проект достатньо мати оцінку майбутньої врожайності у термінах «висока врожайність» - «низька врожайність». При цьому термін «висока врожайність» означає таке значення врожайності, яке значно перевищує середній рівень врожайності. Такий підхід уможливило використання класифікаційних методів при прогнозуванні врожайності. Підтвердження нормального розподілу перевищень врожайності спрощує їх бінарну класифікацію. Ми пропонуємо віднести до групи «висока врожайність» ті значення врожайності, які з імовірністю $p > 0.67$ розміщені на інтегральній кривій нормального розподілу трендових залишків $F(eps)$ (рис. 4), тобто ті, для яких виконується умова

$$F(eps) > 0.67. \quad (1.3)$$

Значення врожайності, для яких не виконується умова (3), будуть віднесені до групи «низька врожайність».

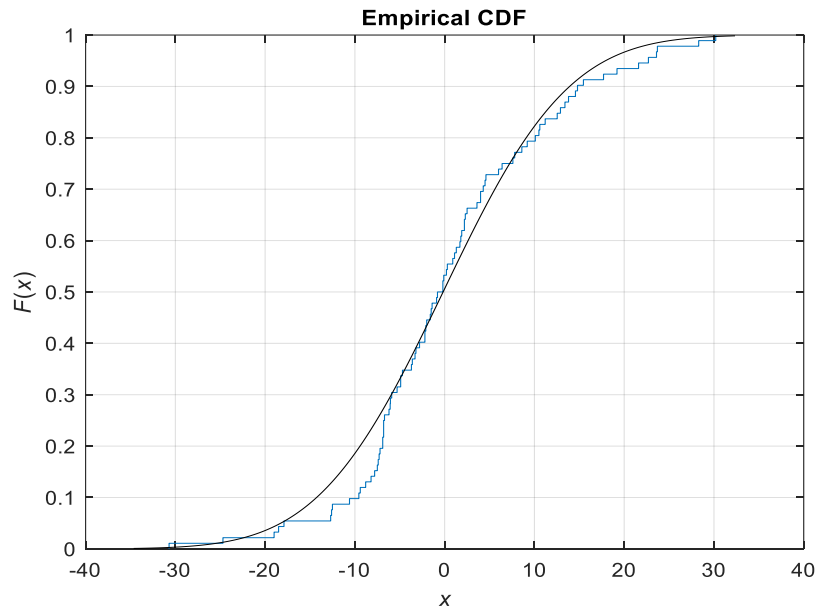


Рис. 4. Інтегральна крива нормального розподілу трендових залишків врожайності для 4-х областей степової зони України

Для реалізації класифікаційного підходу до прогнозування врожайності ми вводимо бінарну змінну bin , яка має лише два значення: 1 («висока врожайність») та 0 («низька врожайність»). Якщо головним завданням є прогнозування високої врожайності, значення змінної bin визначається за правилом

$$bin = \begin{cases} 1, & \text{if } F(eps) > 0.67; \\ 0, & \text{if } F(eps) \leq 0.67. \end{cases} \quad (1.4)$$

У деяких ситуаціях потрібно передбачити не високу врожайність, а її низьке значення (неврожай). Тоді вище описана задача класифікаційного прогнозування змінюється наступним чином. Термін «низька врожайність» означає таке значення врожайності, яке є значно нижчим від середнього рівня врожайності. До групи «низька врожайність» будуть віднесені ті значення врожайності, які з імовірністю $p < 0.33$ розміщені на інтегральній кривій нормального розподілу трендових залишків, тобто ті, для яких виконується умова

$$F(eps) < 0.33. \quad (1.5)$$

Значення врожайності, для яких не виконується умова (1.5), будуть віднесені до групи «висока врожайність».

Бінарна змінна врожайності bin тепер буде визначатися за наступним правилом

$$bin = \begin{cases} 1, & \text{if } F(eps) < 0.33; \\ 0, & \text{if } F(eps) \geq 0.33. \end{cases} \quad (1.6)$$

Методика класифікаційного моделювання врожайності

Для оцінки врожайності у термінах «висока врожайність», «низька врожайність» необхідно здійснити попередню обробку даних врожайності. Для цього ми використали процедуру біннінгу, алгоритм якої полягає у розбитті набору історичних змінних на дві категорії, базуючись на оцінці перевищення врожайності над середнім (трендовим) значенням. Таким чином, побудова моделі врожайності передбачатиме проведення таких етапів [Клебан]:

- 1) збір даних для дослідження, формування тренувальної та тестової вибірок;
- 2) розбиття значень пояснюючих змінних на дві непересічні категорії;
- 3) побудова класифікаційної моделі на навчальній вибірці;
- 4) оцінка адекватності побудованих моделей на тестовій вибірці за критерієм AUROC (*area under receiver operating characteristic* [Fawcett, Tom]);

5) аналіз отриманих результатів та формування висновків щодо ефективності моделі.

Для побудови математичної моделі було використано набір даних врожайності пшениці у чотирьох областях степової зони України (Херсонська, Одеська, Запорізька, Кіровоградська) за період 2000 – 2021 роки та відповідні значення метеофакторів. Проблема вибору метеорологічних факторів, які найбільш впливають на врожайність зернових була розглянута в роботі [Грицюк, Бачишина]. Було показано, що найбільш суттєвим для майбутньої врожайності є вплив метеорологічних умов квітня, травня та червня, тобто періоду, коли відбувається основний ріст та формування рослини. У даній роботі досліджується вплив середньодекадних температур та місячних сум опадів вказаного періоду на значення врожайності пшениці. Місячні значення суми опадів були обрані нами з огляду на той факт, що в умовах степової зони багато декадних значень сум опадів є близькими до нуля. Ми використовували наступні позначення факторів (табл. 1)

Таблиця 1

Позначення впливаючих факторів		
Позначення	Фактор	Період
<i>t1</i>	Середньодекадна температура	Перша декада квітня
<i>t2</i>	Середньодекадна температура	Друга декада квітня
<i>t3</i>	Середньодекадна температура	Третя декада квітня
<i>t4</i>	Середньодекадна температура	Перша декада травня
<i>t5</i>	Середньодекадна температура	Друга декада травня
<i>t6</i>	Середньодекадна температура	Третя декада травня
<i>t7</i>	Середньодекадна температура	Перша декада червня
<i>t8</i>	Середньодекадна температура	Друга декада червня
<i>t9</i>	Середньодекадна температура	Третя декада червня
<i>R10</i>	Місячна сума опадів	Квітень
<i>R20</i>	Місячна сума опадів	Травень
<i>R30</i>	Місячна сума опадів	Червень

Масив досліджуваних даних містить статистичні дані щодо врожайності пшениці [21] та 12 метеорологічних факторів [Климатический монитор] для 4-х областей степової зони за період 2000 – 2021 роки (22 роки), які мають числовий характер. Залежною змінною є бінарний показник *eps*, що вказує на факт перевищення врожайності пшениці над трендовим значенням (значення «1» - «висока врожайність», значення «0» - «низька врожайність»). Структура вхідного набору даних представлена у табл. 2. Дані навчальної та тестової вибірки розділені у пропорції 75/25, і не повторюються в межах моделі.

Таблиця 2

Початковий набір даних		
	«висока врожайність»	«низька врожайність»
Значення бінарної змінної	1	0
Кількість записів, од	31	57
Частка, %	35,2	64,8

Для побудови та тестування моделей використовувалася кросвалідація з розбиттям на 10 груп [Berrag, D]. У процесі перехресного тестування моделі склад навчальної та тестової вибірки змінювався випадковим чином, тому їх структуру вказати неможливо.

При моделюванні перевищення врожайності над трендовим значенням результатом розрахунку є дійсне число, неперервне на інтервалі [0;1], що визначає ймовірність перевищення. У машинному навчанні оцінка прогнозної здатності моделі здійснюється з використанням кривої AUC-ROC, яка дає змогу оцінити та візуалізувати ефективність класифікації [Fawcett]. Площа під ROC-кривою AUC (Area Under Curve) є агрегованою характеристикою якості класифікації. Чим вище значення AUC, тим краще модель ідентифікує зразок з характеристикою «висока врожайність». Дуже хороша модель класифікації має значення AUC, близьке до 1, погана модель має значення AUC менше від 0,5. При значеннях AUC > 0.75 класифікаційна модель вважається хорошою.

Модель логістичної регресії

Класифікаційний підхід до прогнозування врожайності передбачає бінаризацію (біннінг) історичних даних врожайності, тобто переведення числових значень врожайності у бінарну змінну, яка набуватиме лише двох значень: «0» (низька врожайність) чи «1» (висока врожайність). Тоді регресійне моделювання врожайності полягає у моделюванні неперервної змінної, що приймає значення з інтервалу [0;1].

Для моделювання бінарних даних використовують моделі бінарного вибору: *probit*- та *logit*-моделі, результуючі значення яких можуть трактуватися як перевищення (неперевищення) врожайності деякого порогового значення. Логістична регресія - регресія, у якій пояснювана змінна - факторна, а пояснюючі змінні можуть бути і кількісними і факторними.

Формальна постановка задачі полягає в наступному. Нехай змінна eps визначає величину перевищення врожайності над середнім (трендовим) значенням врожайності та набуває значень 0 чи 1 відповідно. Кожен об'єкт характеризується m -мірним вектором ознак, що в сукупності утворює масив інформації $X = (x_{ij})$, ($j = 1, m$ – номер показника; $i = 1, n$ – номер часового періоду).

Класичне рівняння лінійної регресії має вигляд:

$$P_1 = P(eps = 1) = X\beta, \quad (2.2)$$

де β_m – шукані коефіцієнти регресії, змінна $P_1 = P(eps=1)$ – ймовірність високої врожайності. Але лінійна модель ймовірності типу (2.2) не дасть потрібних значень залежної змінної на проміжку $[0;1]$. Для вирішення цієї проблеми використовують *probit*- та *logit*-моделі, в яких припускається, що:

$$P_1 = F(X\beta), \quad (2.4)$$

де F – функція, область значень якої належить інтервалу $[0;1]$.

Для реалізації функції F зазвичай використовують два види функцій розподілу:

- функція стандартного нормального розподілу (для *probit*-моделі):

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}; \quad (2.5)$$

- функція логістичного розподілу (для *logit*-моделі):

$$F(z) = \frac{e^z}{1 + e^z}. \quad (2.6)$$

Для вибору найкращої моделі ймовірності необхідно оцінити значення коефіцієнтів β моделі (2.2). Найпоширенішим способом оцінки параметрів є метод максимальної правдоподібності.

З метою порівняння ефективності різних моделей для прогнозування перевищень врожайності побудуємо *probit*- та *logit*-моделі на основі навчальної вибірки з 66 випадково вибраних спостережень та 12 факторів. Для оцінки ефективності класифікації використано такі показники: матриця помилок (*Confusion matrix*), загальна точність класифікації за певного рівня розмежування (*Accuracy*), чутливість (*Sensitivity*), специфічність (*Specificity*) та площа під кривою (*AUROC*). Всі розрахунки проводилися в програмному середовищі R.

Матриця помилок будується на основі результатів класифікації моделлю та фактичної приналежності спостережень до класів. В контексті поставленої задачі в матриці наводиться чотири випадки:

- TP (*True Positives*) – модель вірно виявила перевищення врожайності;
- FP (*False Positives*) – низька врожайність помилково розпізнається як висока врожайність;
- FN (*False Negatives*) – висока врожайність помилково розпізнається як низька врожайність;
- TN (*True Negatives*) – модель вірно виявила випадок низької врожайності.

Матриця помилок має наступний вигляд:

Фактичні дані	Результати тесту	
	Низька врожайність	Висока врожайність
Низька врожайність	TN	FP
Висока врожайність	FN	TP

Побудуємо GLM-модель логістичної регресії для описаного вище набору даних, який описує 4 області степового регіону України. Змінна-відгук (перевищення врожайності над трендом) була бінаризована за правилом (1.4). Випадковим чином розіб'ємо набір на дві частини: навчальна вибірка (66 рядків) та тестова вибірка (22 рядки). У якості факторів GLM-моделі нами були вибрані змінні $t7$ та $R10$, які, згідно з даними кореляційного аналізу, чинять найбільший вплив на врожайність. Характеристики моделі, побудованої на навчальній вибірці представлені у табл. 7. На основі побудованої моделі ми побудували прогноз на тестовій вибірці. Якість прогнозовної класифікації визначає таблиця прогнозних оцінок табл. 8.

Таблиця 7

Характеристики GLM-моделі

	Estimate	SE	Z value	Pr(> z)
Intercept	14.3641	3.7441	3.84	0.00012
t7	-0.8398	0.2054	-4.09	4.3e-05
R10	0.0331	0.0151	2.20	0.02809
Null deviance: 84.020 on 65 degrees of freedom				
Residual deviance: 53.196 on 63 degrees of freedom				
AIC: 59.20				

Таблиця 2.8

Характеристики якості класифікації за моделлю GLM

№	Модель	AUC	Sensitivity	Specificity	Accuracy
1	Модель <i>logit</i>	0.8890	0.8000	0.9167	0.8636
2	Модель <i>probit</i>	0.8800	0.7778	0.8462	0.8182

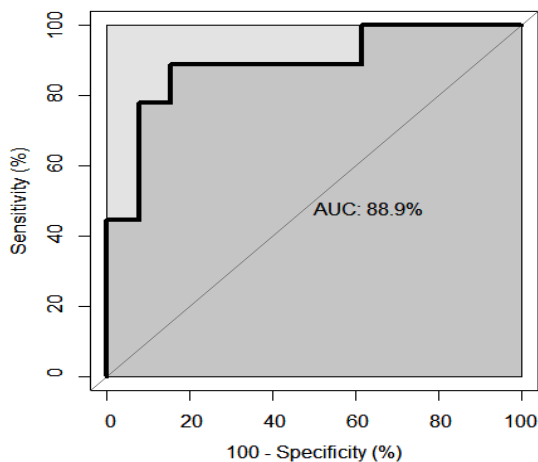


Рис. 4. ROC крива для тестової вибірки логіт моделі

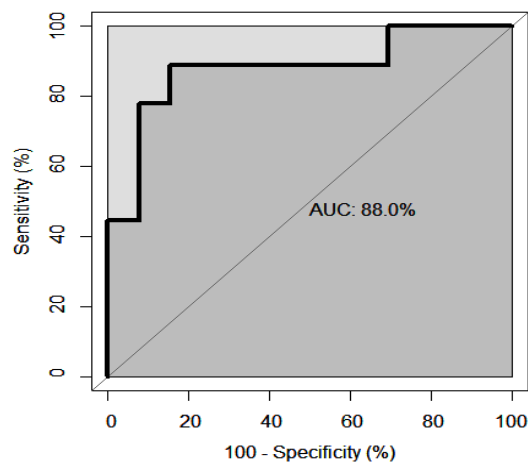


Рис. 2.5. ROC крива для тестової вибірки пробіт моделі

Якість логіт моделі є дещо вищою від якості пробіт моделі. Точність логіт моделі, яка вказує на частку правильно класифікованих значень врожайності на тестовій вибірці, становить 86.36%. Це свідчить про хорошу якість класифікаційної моделі. Для візуальної оцінки коректності моделі бінарної класифікації на рис 4 представлена ROC-крива помилок. Як видно з рисунка, агрегована характеристика якості класифікації логіт моделі становить AUC = 88.9%. Агрегована якість класифікація пробіт моделі становить 88.0%.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Прогнозування врожайності є складною задачею, суть якої визначається випадковим характером багатьох впливаючих факторів. Тому для вирішення цієї задачі доцільно застосовувати методи інтелектуального аналізу даних із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій. Дискусійним моментом є критерій якості прогнозу моделі. Похибка прогнозу не може виступати таким критерієм, адже більш важливими є показники правильності передбачення зростання/спадання врожайності та перевищення/недосягнення врожайністю середнього/трендового значення.

Для вирішення багатьох задач при плануванні аграрного бізнесу не обов'язково мати точний прогноз врожайності. Для прийняття рішення щодо інвестування у конкретний проект достатньо мати оцінку майбутньої врожайності у термінах «висока врожайність» - «низька врожайність». При цьому термін «висока врожайність» означає таке значення врожайності, яке значно перевищує середнє/трендове значення врожайності. У даній роботі запропоновано класифікаційний підхід до прогнозування врожайності пшениці в областях степової зони України з використанням комп'ютерних моделей класифікації даних.

Нами побудовані дві моделі для класифікації перевищення врожайності над трендовим значенням, які ґрунтуються на логіт регресії та пробіт регресії. Обидві моделі забезпечують високу якість класифікації з незначною перевагою логіт моделі. Агрегована якість класифікації обох моделей перевищує 88%, що є дуже хорошим результатом для такої складної задачі як моделювання залежності врожайності від метеорологічних факторів в умовах невеликої вибірки даних. Запропонований нами підхід може бути використаний для класифікації значень врожайності інших сільськогосподарських культур з використанням інших методів машинного навчання. Проведені дослідження та запропонована методика можуть бути використані при прийнятті рішень щодо інвестування у проекти аграрної економіки.

Література

1. Грицюк П.М., Бачишина Л.Д. Вплив зміни кліматичних умов на динаміку врожайності зернових в Україні // Економіка України. – 2016, № 6 (655), с.68 – 75
2. J. Lee and M. J. Connaughton. Effects of Weather on Wheat Yields. - Irish Journal of Agricultural Research. - Vol. 8, No. 3, Dec., 1969. pp. 349-357.
3. Даніель Мюллер, Анне Юнгандреас, Фрідріх Кох та ін. Вплив кліматичних змін на виробництво пшениці в Україні. Німецько-український агрополітичний діалог. – Київ, 2016. – 45с.
4. Кернасюк Ю.В. Адаптація до кліматичних змін: економіка технологій поливу. – Економічний гектар. 03.06.2020. <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/17754-adaptatsiia-do-klimatichnykh-zmin-ekonomika-tekhnologii-polyvu.html>
5. О.О. Кривошеїн, Л.П. Однолеток, Л.П. Дзюба. Оцінка впливу погодних умов та організаційно-

технологічних заходів на урожайність озимої пшениці за її кліматичним потенціалом. – Наукові праці УкрНДГМІ, 2016, Вип. 269. – с.151-158

6. Кобченко Ю.Ф., Кобченко О.Ю., Резуненко В.А. Вплив погодних факторів на формування урожаю зернових культур у Харківській області. – Вісник Харківського національного університету. – 2014, №1098. – с.86-91

7. Kurt Heil, Anna Lehner and Urs Schmidhalter. Influence of Climate Conditions on the Temporal Development of Wheat Yields in a Long-Term Experiment in an Area with Pleistocene Loess. - *Climate* 2020, 8, 100, 17p. www.mdpi.com/journal/climate

8. Beillouin D, Schauburger B, Bastos A, Ciais P, Makowski D. 2020 Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. - *Phil. Trans. R. Soc. B* 375. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>

9. Konduri V., Vandal T., Ganguly S., Ganguly A. Data science for weather impacts on crop yield. *Front. Sustain. Food Syst.*, Vol. 4, May 2020

10. Державна служба статистики України. <http://www.ukrstat.gov.ua/>

11. Клебан Ю.В. Дослідження способів трансформації даних в контексті підвищення ефективності моделей кредитного скорингу. Нейронечіткі технології моделювання в економіці. Науково-аналітичний журнал. Київ, 2019. №8. С.94-123.

12. Fawcett, Tom. An Introduction to ROC Analysis. *Pattern Recognition Letters*. 27 (8) (2011). P. 861–874

13. Климатический мониторинг <http://www.pogodaiklimat.ru/>

14. Berrar, D. Cross-Validation. *Encycl. Bioinform. Comput. Biol.* 2019, 1, 542–545. URL: https://www.researchgate.net/publication/324701535_Cross-Validation

References

1. Hrytsiuk P.M., Bachyshyna L.D. Vplyv zminy klimatichnykh umov na dynamiku vrozhaynosti zemovoy v Ukraini // *Economicka Ukrainy*. - 2016, № 6 (655), p.68 – 75

2. J. Lee and M. J. Connaughton. Effects of Weather on Wheat Yields. - *Irish Journal of Agricultural Research*. - Vol. 8, No. 3, Dec., 1969. pp. 349-357.

3. Daniel Muller, Anne Yunhandreas, Fridrih Koch et al. Vplyv klimatichnykh zmin na vyrobnytstvo pshenyci v Ukraini. *Nimecko-ukrainsky ahropolitychny dialoh*. – Kyiv, 2016. – 45p.

4. Kernasiuk Yu.V. Adaptatsiya do klimatichnykh zmin: ekonomika tekhnohii polyvu. – *Ekonomichny hektar*. 03.06.2020. <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/17754-adaptatsiya-do-klimatichnykh-zmin-ekonomika-tekhnohii-polyvu.html>

5. O.O. Kryvoshein, L.P. Odnoletok, L.P. Dzyuba. Ocinka vplyvu pohodnykh umov ta orhanizatsiyno-tekhnohichnykh zahodiv na urozhaynist ozymoi pshenyci za ii klimatichnym potentsialom. – *Naukovi praci UkrNDHMI*, 2016, Vyp. 269. – с.151-158.

6. Kobchenko Yu.F., Kobchenko O.Yu., Rezunencko V.A. Vplyv pohodnykh factoriv na formuvannya urozhayu zemovoy kultur u Harkivskiy oblasti. – *Visnyk Harkivskoho nacionalnoho universytetu*. – 2014, №1098. – p.86-91

7. Kurt Heil, Anna Lehner and Urs Schmidhalter. Influence of Climate Conditions on the Temporal Development of Wheat Yields in a Long-Term Experiment in an Area with Pleistocene Loess. - *Climate* 2020, 8, 100, 17p. www.mdpi.com/journal/climate

8. Beillouin D, Schauburger B, Bastos A, Ciais P, Makowski D. 2020 Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. - *Phil. Trans. R. Soc. B* 375. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>

9. Konduri V., Vandal T., Ganguly S., Ganguly A. Data science for weather impacts on crop yield. *Front. Sustain. Food Syst.*, Vol. 4, May 2020

10. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. <http://www.ukrstat.gov.ua/>

11. Kleban Yu.V. Doslidzhennia sposobiv transformacii danyh v kontexti pidvyshchennia efektyvnosti modeley kredytnoho skorynhu. *Nejronechitki tehnolohii modeluvannya v ekonomici. Naukovo-analitychny zhurnal*. Kyiv, 2019. №8. p.94-123.

12. Fawcett, Tom. An Introduction to ROC Analysis. *Pattern Recognition Letters*. 27 (8) (2011). P. 861–874

13. Klimaticheskyy monitor <http://www.pogodaiklimat.ru/>

14. Berrar, D. Cross-Validation. *Encycl. Bioinform. Comput. Biol.* 2019, 1, 542–545. URL: https://www.researchgate.net/publication/324701535_Cross-Validation

ЩЕРБАНЬ В. Ю.

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0002-4274-4425>
scherbanvu@ukr.net

ЩЕНКО В. Д.

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0003-2180-5257>
kipt@i.com.ua

КОЛИСКО О. З.

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0003-4043-1238>
kipt@i.com.ua

ГОЛЬДБЕРГ М. І.

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0002-9982-7264>
kipt@i.com.ua

ЩЕРБАНЬ Ю. Ю.

Київський фаховий коледж прикладних наук
<https://orcid.org/0000-0001-5024-8387>
scherban@i.ua

КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ДЕЙКСТРИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ ЗАПРАВКИ НИТКИ НА ОСНОВІ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ ГРАФА

На основі використання логічно-послідовної теоретично-множинної математичної моделі системи подачі нитки на технологічному обладнанні, з використанням алгоритму Дейкстри пошуку оптимального шляху графа, отримане математичне та алгоритмічне забезпечення для визначення форми заправки.

Ключові слова: алгоритм Дейкстри, граф, оптимальний шлях, комп'ютерна програма, система подача нитки.

Volodymyr SHCHERBAN, Valentin ISHCHENKO, Oksana KOLISKO, Marjana GOLDBERG
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
Yuryj SHCHERBAN
Kyiv Professional College of Applied Sciences

COMPUTER IMPLEMENTATION OF DIJKSTRA'S ALGORITHM FOR DETERMINING THE FORM OF THREAD REFILLING ON THE BASIS OF SEARCHING FOR THE OPTIMAL PATH OF THE GRAPH

Minimization of thread tension during processing on technological machines allows to reduce the probability of breakage in the working area. This is achieved by optimizing the geometric parameters of the thread feed system on process equipment, namely obtaining such a broken thread shape, in which the total angle of coverage of structural elements of process equipment in the form of cylindrical guides and torus, elements of tensioning devices will have a minimum value. This will reduce the amount of friction between the thread and the guide surfaces and get the minimum tension in the working area. Given the large number of structural elements of the thread feed system on technological machines, their location in the plane and space, there is a need to use modern information technology. Implementing this requires the use of algorithms and computer programs to find the optimal path of the graph using the Dijkstra algorithm. Determining the tension and changes in relative tension in the refueling zones of technological machines, taking into account the specifics of the design of the thread feed system, will reduce thread breakage, optimize the process of thread processing on technological machines of light industry is to minimize tension and should be based on theoretical and experimental studies of the interaction of threads with structural elements of the feed system, including tensioning devices, breakage control and guides of large and small curvature. Imperfect shape of the thread filling line on technological machines of light industry, low quality of complex threads and yarn with increasing tension along the depth of filling leads to their breakage. Thread tension in the working area of the source product.

Keywords: Dijkstra algorithm, graph, optimal path, computer program, thread feed system.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Мінімізація натягу нитки при переробці на технологічних машинах дозволяє зменшити ймовірність обриву в робочій зоні. Це досягається шляхом оптимізації геометричних параметрів системи подачі нитки на технологічному обладнанні, а саме отримання такої ламаної форми нитки, при якій сумарний кут охоплення конструктивних структурних елементів технологічного обладнання у вигляді направляючих циліндричної форми та у формі тора, елементів пристроїв для натягу, пристроїв для контролю обриву буде мати мінімальне значення. Це дозволить зменшити величину сили тертя між ниткою та напрямними поверхнями і отримати в робочій зоні мінімальний натяг. Враховуючи велику кількість структурних елементів системи подачі нитки на технологічних машинах, їх розташування у площині та просторі виникає необхідність використання сучасних інформаційних технологій. Реалізація цього потребує використання алгоритмів та комп'ютерних програм для пошуку оптимального шляху графа з використанням алгоритму Дейкстри. Визначення напруженості та зміни відносного натягу по зонах заправки технологічних машин, з урахуванням специфіки конструкції системи подачі нитки, дозволить зменшити обривність ниток, оптимізації натягу ниток в робочій зоні формування вихідного продукту.

Аналіз досліджень та публікацій

Удосконалення процесу переробки ниток на технологічних машинах легкої промисловості полягає в мінімізації натягу і повинно базуватися на теоретичних та експериментальних дослідженнях процесу взаємодії ниток з структурними елементами системи подачі [1-3, 7-9], зокрема пристроями для натягу, для контролю обриву та спрямовувачами великої та малої кривизни [2-5]. Недосконала форма лінії заправки нитки на технологічних машинах легкої промисловості, низька якість комплексних ниток та пряжі при зростанні натягу по глибині заправки призводить до їх обривів [4-8].

Отримання ламаної форми нитки, при якій сумарний кут охоплення конструктивних структурних елементів технологічного обладнання у вигляді направляючих циліндричної форми та у формі тора [1-2], елементів пристроїв для натягу [5], пристроїв для контролю обриву буде мати мінімальне значення дозволяє зменшити напруженість та відносний натяг по зонах заправки технологічних машин [7-9].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: комп'ютерна реалізація алгоритму Дейкстри для визначення форми заправки нитки на основі пошуку оптимального шляху графа.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1а, 1б, 1в представлений загальний вигляд відповідно круглов'язальної, плосков'язальної машини та ткацького верстата.

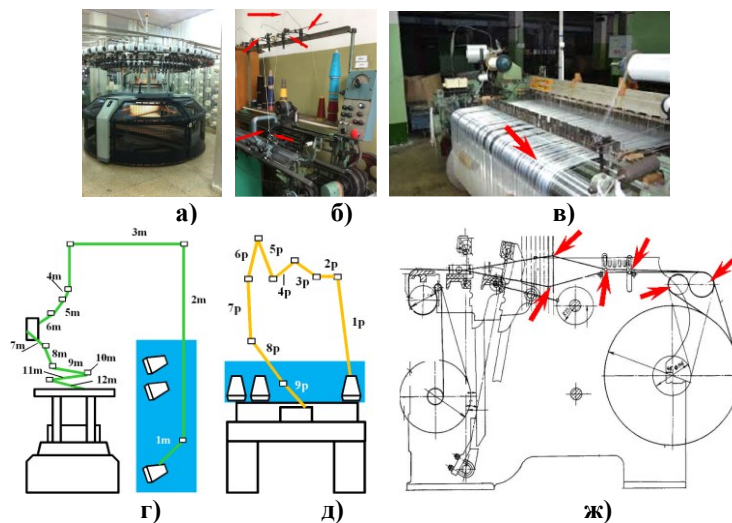


Рис.1. Загальний вигляд: а) круглов'язальної машини; б) плосков'язальної машини; в) ткацького верстата; схема заправки: г) круглов'язальної машини; д) плосков'язальної машини; ж) ткацького верстата

На рис. 1г, 1д, 1ж представлені розрахункові схеми відповідно круглов'язальної, плосков'язальної машини та ткацького верстата.

Теоретично множинна математична модель визначення форми заправки нитки на основі алгоритму Дейкстри пошуку оптимального шляху графа має логічно-послідовний вигляд. Розв'язок задачі пошуку оптимальної траєкторії можна отримати, скориставшись моделлю у вигляді неорієнтованого графа $G_{tfs}(V_{tfs}, E_{tfs})$, який представляє собою сукупність двох множин

$$G_{tfs}(V_{tfs}, E_{tfs}) = \langle V_{tfs}, E_{tfs} \rangle, \quad (1)$$

де V_{tfs} - непуста множина вершин контакту; E_{tfs} - множина ребер, яка складається з неупорядкованих пар вершин контакту множини V_{tfs} .

На рис.2а представлена загальна розрахункова схема заправки нитки.

Для неорієнтованого графа (1) $G_{tfs}(V_{tfs}, E_{tfs})$ повинні виконуватися наступні відношення

$$V_{tfs} \neq \emptyset, E_{tfs} \subset V_{tfs} \times V_{tfs}, E_{tfs} = E_{tfs}^{-1}.$$

Матриця суміжності неорієнтованого графа (1) симетрична відносно головної діагоналі. Елементи множини P_{tfs} представляють інцидентії графа $G_{tfs}(V_{tfs}, E_{tfs})$, які вказують яку пару $V_{(i)n_i}$,

$V_{(i+1)n_{i+1}}$ елементів множини вершин V_{tfs} з'єднує той чи інший елемент $e_{[(i)-(i+1)]}^{[(i)-(i+1)]}$ множини ребер E_{tfs} графа (1)

$$P_{tfs} = \left\{ (v_{1s}, \bigcup_{j=1}^{n_2} e_{(j)}^{[(1)-(2)]}, \bigcup_{j=1}^{n_2} v_{2j}), \bigcup_{k=1}^{n-2} (v_{(i)k}, e_{(k)}^{[(i)-(i+1)]}, v_{(i+1)k+1}), (\bigcup_{j=1}^{n-1} v_{(n-1)j}, \bigcup_{j=1}^{n-1} e_{(j)}^{[(n-1)-(n)]}, v_{nt}) \right\}. \quad (2)$$

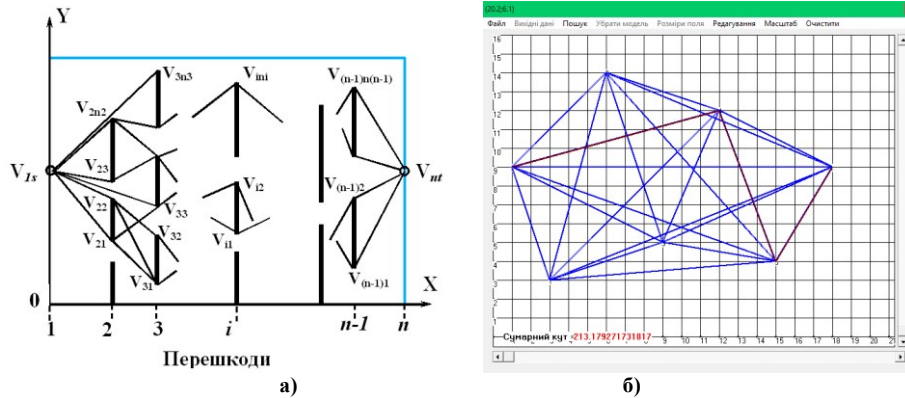


Рис.2. Система подачі нитки: а) розрахункова схема; б) результати розрахунку

Непуста множина вершин V_{tfs} графа (1) визначається з наступної системи

$$V_{tfs} = \bigcup_{k=1}^n V_k, \{v_{1s}\} \in V_1, \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n2}\} \in V_2, \dots, \{v_{(n-1)1}, v_{(n-1)2}, \dots, v_{(n-1)n-1}\} \in V_{n-1}, \{v_{nt}\} \in V_n, \quad (3)$$

де V_k - підмножина вершин контакту нитки з перешкодами k рівня; n - кількість перешкод; $v_{1s}, v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n2}, v_{31}, v_{32}, \dots, v_{3n3}, \dots, v_{mi}, v_{(n-1)1}, \dots, v_{(n-1)n-1}, v_{nt}$ - відповідно точки вершин контакту з перешкодами 1, 2, ..., $n-1$, n рівня; $1s, n_2, \dots, n_{n-1}, nt$ - відповідно кількість точок вершин контакту з 1, 2 ... $n-1$, n перешкодами.

Множина ребер E_{tfs} визначається з наступної системи

$$E_{tfs} = \bigcup_{k=1}^{n-1} E_{[(k)-(k+1)]}, \{e_{(1s-21)}^{[(1)-(2)]}, e_{(1s-22)}^{[(1)-(2)]}, \dots, e_{(1s-2n2)}^{[(1)-(2)]}\} \in E_{[(1)-(2)]}, \{e_{(21-31)}^{[(2)-(3)]}, e_{(21-32)}^{[(2)-(3)]}, \dots, e_{(2n2-3n3)}^{[(2)-(3)]}\} \in E_{[(2)-(3)]}, \dots, \{e_{[(n-1)1-nt]}^{[(n-1)-(n)]}, e_{[(n-1)2-nt]}^{[(n-1)-(n)]}, \dots, e_{[(n-1)n_{n-1}-nt]}^{[(n-1)-(n)]}\} \in E_{[(n-1)-(n)]}, \quad (4)$$

де k - кількість зон розташування ребер неорієнтованого графа; $e_{(1)}^{[(1)-(2)]}, \dots, e_{(n-1)}^{[(n-1)-(n)]}$ - відповідні ребра неорієнтованого графа $G_{tfs}(V_{tfs}, E_{tfs})$.

Геометрична ідентифікація між вершинами (3) та відповідним ребром (4) для зони між першою та другою перешкодами. Верхній індекс вказує між якими перешкодами розташовані ребра. Нижній індекс вказує для яких вершин на попередній та поточній перешкодах відноситься ребро.

$$e_{(1s-21)}^{[(1)-(2)]} = (v_{1s}, v_{21}), e_{(1s-22)}^{[(1)-(2)]} = (v_{1s}, v_{22}), \dots, e_{(1s-2n2)}^{[(1)-(2)]} = (v_{1s}, v_{2n2}).$$

Геометрична ідентифікація між вершинами та відповідним ребром для зони між другою та третьою перешкодами.

$$e_{(21-31)}^{[(2)-(3)]} = (v_{21}, v_{31}), e_{(21-32)}^{[(2)-(3)]} = (v_{21}, v_{32}), \dots, e_{(21-3n3)}^{[(2)-(3)]} = (v_{21}, v_{3n3}), e_{(22-31)}^{[(2)-(3)]} = (v_{22}, v_{31}), e_{(22-32)}^{[(2)-(3)]} = (v_{22}, v_{32}), \dots, e_{(22-3n3)}^{[(2)-(3)]} = (v_{22}, v_{3n3}),$$

...

$$e_{(2n2-31)}^{[(2)-(3)]} = (v_{2n2}, v_{31}), e_{(2n2-32)}^{[(2)-(3)]} = (v_{2n2}, v_{32}), \dots, e_{(2n2-3n3)}^{[(2)-(3)]} = (v_{2n2}, v_{3n3}).$$

Геометрична ідентифікація між вершинами та відповідним ребром для зони між передостанньою та останньою перешкодами.

$$e_{[(n-1)1-nt]}^{[(n-1)-(n)]} = (v_{(n-1)1}, v_{nt}), e_{[(n-1)2-nt]}^{[(n-1)-(n)]} = (v_{(n-1)2}, v_{nt}), \dots, e_{[(n-1)n_{n-1}-nt]}^{[(n-1)-(n)]} = (v_{(n-1)n_{n-1}}, v_{nt}).$$

Множина вершин, суміжних з вершиною входу V_{1s} буде множиною суміжності вершини входу

$$\Gamma^+(v_{1s}) = \left\{ \bigcup_{j=1}^{n_2} e_{(j)}^{(1-2)} \in V_{fs} \mid \left(\bigcup_{j=1}^{n_2} e_{(j)}^{(1-2)}, v_{1s} \right) \in E_{fs} \right\}.$$

Множина вершин, суміжних з вершиною виходу V_{nt} буде множиною суміжності вершини виходу

$$\Gamma^+(v_{nt}) = \left\{ \bigcup_{j=1}^{n_{n-1}} e_{(j)}^{[(n-1)-(n)]} \in V_{fs} \mid \left(\bigcup_{j=1}^{n_{n-1}} e_{(j)}^{[(n-1)-(n)]}, v_{nt} \right) \in E_{fs} \right\}.$$

Для неорієнтованого графа $G_{fs}(V_{fs}, E_{fs})$ найкоротшим шляхом з вершини V_{1s} до вершини V_{nt} буде називатися шлях, який має мінімальне значення суми вагових функцій ребер.

На рис.2б представлені результати комп'ютерного визначення оптимальної лінії заправки нитки.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отримане математичне забезпечення для комп'ютерної реалізації алгоритму Дейкстри для визначення форми заправки нитки на основі пошуку оптимального шляху графа.

Література

1. Щербань В.Ю. Механіка нитки / В.Ю.Щербань. -К.:Освіта України, 2018.- 533 с.
2. Щербань В.Ю. Базове проектує забезпечення САПР в індустрії моди / В.Ю. Щербань, Ю.Ю. Щербань, О.З. Коліско, Г.В. Мельник, М.І. Шолудько, В.Ю. Калашник. – К.:Освіта України, 2018. – 902 с.
3. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application / V. Yu. Scherban, S.M. Krasnitsky, V.G. Rezanov.-К.:KNUTD, 2011. -220p.
4. Щербань В.Ю. САПР оборудования и технологических процессов легкой и текстильной промышленности / В.Ю. Щербань, О.И. Волков, Ю.Ю. Щербань. - К.:Бумсервис, 2004. - 519 с.
5. Щербань В.Ю. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі/ В.Ю.Щербань, В.Ю.Калашник, О.З.Коліско, М.І.Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – 223(2). - С.25-29.
6. Computer systems design: software and algorithmic components / V.Y. Shcherban, O.Z. Kolisko, G.V. Melnyk, M.I. Sholudko, V.Y. Kalashnik. – К.: Education of Ukraine, 2019. – 902 p.
7. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry / V. Yu. Scherban, O.Z. Kolisko, M.I. Sholudko, V. Yu. Kalashnik. – К.: Education of Ukraine, 2017. – 745 p.
8. Shcherban V. Warp yarn tension during fabric formation / V. Shcherban, G. Melnyk, M. Sholudko, V. Kalashnyk // Fibres and Textiles. – 2018. – volume 25. - №2. – PP.97-104.
9. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum / I.A. Yakubitskaya, V.V. Chugin, V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1997. - №6. - P.50-54.

References

1. Scherban V.Yu. Mechanics of Threads / V.Yu.Scherban. -K.: Formation of Ukraine, 2018.- 533 p.
2. Shcherban V.Yu. Basic design support of CAD in the fashion industry / V.Y. Shcherban, Y.Y. Shcherban, O.Z. Kolisko, G.V. Melnik, M.I. Sholudko, V.Y. Kalashnik. - Kyiv: Education of Ukraine, 2018. - 902 p.
3. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application / V. Yu. Scherban, S.M. Krasnitsky, V.G. Rezanov.-K.:KNUTD, 2011. -220p.
4. Scherban V.Yu. CAD equipment and technological processes for light and textile industries / V.Yu. Shcherban, O.I. Volkov, Yu.Yu. Shcherban. - K.: Boomservice, 2004. - 519 p.
5. Scherban V.Yu., Kalashnik V.Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I.. Investigation of the influence of the thread material and the anisotropy of friction on its tension and the shape of the axis // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. - .2015. Volume 223. Issue 2. pp.25-29.
6. Computer systems design: software and algorithmic components / V.Y. Shcherban, O.Z. Kolisko, G.V. Melnyk, M.I. Sholudko, V.Y. Kalashnik. – К.: Education of Ukraine, 2019. – 902 p.
7. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry / V. Yu. Scherban, O.Z. Kolisko, M.I. Sholudko, V. Yu. Kalashnik. – К.: Education of Ukraine, 2017. – 745 p.
8. Shcherban V. Warp yarn tension during fabric formation / V. Shcherban, G. Melnyk, M. Sholudko, V. Kalashnyk // Fibres and Textiles. – 2018. – volume 25. - №2. – PP.97-104.
9. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum / I.A. Yakubitskaya, V.V. Chugin, V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1997. - №6. - P.50-54.

ПРИГОЖЕВ О. С.

Державний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-8532-8897>e-mail: o.s.prygozhev@op.edu.ua

МОВНОНЕЗАЛЕЖНИЙ РЕПОЗИТАРІЙ ПРОГРАМНОГО КОДУ

У статті розглядається побудова мовнонезалежного репозитарію програмного коду, який засновано на новій моделі представлення програмного коду на основі мультиграфу із токенами предметної області. Розглянуто основні аналоги системи. Наведено порівняльний аналіз аналогічних рішень. На основі аналізу зроблено висновок про необхідність розробки нової моделі представлення програмного коду на основі мультиграфу. Розроблена модель представлення оброблюваних даних для такої моделі – токен предметної області. Розроблено представлення основних алгоритмічних конструкцій на основі розробленої моделі. Синтезовано архітектуру репозитарію, засновану на новій моделі предметної області

Keywords: multigraph, tokens of subject area, program code, software code repository

Oleksandr PRYGOZHEV

State University "Odessa Politechnic"

LANGUAGE INDEPENDENT SOFTWARE CODE REPOSITORY

The article considers the construction of a language-independent repository of program code, which is based on a new model of program code representation based on a multigraph with tokens of the subject area. The main analogues of the system and the models on which they are based are considered: finite state machines, Petri nets, P-schemes. A comparative analysis of similar solutions is given. During the analysis, three main indicators were used: the ability to model the implementation of the program step by step ("white box"), the ability to build an interface in natural language, isomorphism of basic mathematical concepts. Based on the analysis, it was concluded that it is necessary to develop a new model of program code based on multigraph, which will represent the functioning of the program as a "white box", be able to build an interface in natural language and be a completely isomorphic basic mathematical concept. The model of representation of the processed data for such model - the token of subject area is developed. It includes information about the attribute name, its type, and the current value. The model code based on the multigraph is multilayered. Each layer reproduces some program code procedure. Each layer contains a representation of the algorithm of the procedure. Representation of the basic algorithmic constructions is developed: compositions of two operators, alternatives and a cycle with postcondition and precondition on the basis of the developed multigraph model. Data processing is modeled as the movement of one subject area token by a synthesized multigraph. The repository architecture based on the new subject area model is synthesized

Keywords: multigraph, tokens of subject area, program code, software code repository

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний етап розвитку програмних систем нерозривно пов'язаний із гнучкими методологіями розробки програмного забезпечення, зокрема такими як Agile, Scrum та інші подібні методології. Ці методології передбачають участь замовника у процесі розробки програмного забезпечення та швидке представлення перших версій (прототипів) програмного продукту на його розгляд.

У таких умовах важливою складовою програмного продукту є інструментальні засоби контролю версій, такі як GitLab, GitHub або Bitbucket. В основі цих продуктів полягає поняття гілок версій, які створюються розробником під час процесу розробки. До кожної з гілок може бути прикріплене символічне ім'я та опис, що дозволяє визначити, до якого етапу розробки належить та чи інша робоча версія програмного продукту.

Кожна з гілок у цих репозитаріях містить увесь код програмного продукту у стиснутому вигляді, щоб під час відкату до попередніх версій можливо було відтворити увесь стан програмного коду продукту.

Недоліком цих систем є зберігання коду програми у вигляді текстового файлу, що дозволяє відтворити версію вирішення задачі лише на тій мові програмування, на якій написаний продукт. У той же час, якщо така сама задача постає у іншому проєкті на іншій мові програмування, її необхідно повторно розробити.

Цю проблему досить часто вирішують за допомогою компонентного підходу, коли код вирішення задачі може бути динамічно прилікований до програмного продукту. Однак цей підхід спрацює лише коли розроблюваний продукт буде працювати в тому самому компонентному середовищі, для якого була створена бібліотека динамічного компонування.

Таким чином, актуальним є створення моделей та методів, що дозволяють зберігати рішення задачі у незалежній від мови програмування формі представлення та повторно використовувати рішення задачі у різних мовах програмування для підвищення продуктивності розробки програмного забезпечення

Для вирішення цієї задачі перспективним є використання моделей подання знань для представлення програмного коду. Розглянемо більш детально існуючі моделі з метою обрання найбільш перспективної для вирішення цієї задачі

Аналіз досліджень та публікацій

До сучасних моделей подання знань, за допомогою яких можливо представити знання про процеси, відносяться, здебільшого, графові моделі: мережі Петрі [1,2], кінцеві автомати [3,4], Р-схеми[5]

Мережа Петрі являє собою дводольний мультиграф, у якому циркулюють відповідні мітки. Виконання дії ілюструється за допомогою вершин переходів, існування умов визначається за допомогою вершин позицій. У позиціях існують мітки, які дозволяють наочно представити процес обробки даних, зокрема, у паралельних системах. Це дозволяє застосовувати їх не лише у паралельних системах, а й під час тестування різноманітних систем

Опис дій на природній мові можливий шляхом зіставлення пояснень ідентифікаторам вершин. Ці пояснення та їх зміст можуть бути у формі довільного тексту, що значно ускладнює процес застосування їх у природно-мовному інтерфейсі

До недоліків мереж Петрі слід віднести її неізоморфність базовим математичним поняттям. Відомо, що поняття n -арної операції визначається як $n+1$ -арне відношення. Зазвичай відношення позначають навантаженими або ненавантаженими ребрами графу. У той же час, у мережі Петрі дія визначається за допомогою вершини, тобто елементу множини.

Кінцеві автомати є більш ізоморфною до цих понять схемою, оскільки переходи, зазвичай, позначаються ребрами, що відповідає поняттю операції, а стан позначається вершинами, що відповідає поняттю елемента множини. Кінцеві автомати не мають засобів, які могли б зіставити їм природно-мовний інтерфейс. Так само ускладнене й формулювання основних алгоритмічних фрагментів.

Р-схеми, представляють обчислювальний процес у формі послідовності ребер, кожне з яких має умову та дію, яка виконується при настанні умови. Поняття дії, як зазначалося вище, пов'язане з поняттям відношення, а отже, ребра графу. Таким чином Р-схема ізоморфна поняттям дії та елементу множини.

Водночас, у Р-схемах відсутні засоби демонстрації обчислювальних процесів, на кшталт множини міток у мережах Петрі. Також самі операції не завжди визначені математично. Досить часто вони виражені словами, інтерпретацію змісту яких покладається повністю на людину. Цей недолік є схожим із таким самим недоліком у мереж Петрі.

Усі розглянуті нами моделі зведемо у таблицю. Символ «+» у таблиці позначає виконання вимоги, «-» - невиконання вимоги

Таблиця 1

Порівняльна характеристика моделей, орієнтованих на процеси

	«Білий ящик»	Природномовність	Ізоморфність
Мережі Петрі	+	-	-
Кінцеві автомати	+	-	-
Р-схеми	+	-	+

Метою роботи є розробка моделі програмного коду на основі графу з метою його використання як внутрішньої форми представлення для репозитарію програмного коду

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі: розробка моделі представлення даних для моделі програмного коду; синтез мовнезалежної моделі програмного коду; синтез програмної системи на основі розробленої мовнезалежної моделі.

Розробка моделі представлення даних для моделі програмного коду

Найменшою одиницею предметної області є атрибут, тип якого є простим типом даних. Формально множину таких атрибутів предметної області будемо визначати за наступною формулою:

$$Attr = Id \times P (Type) \times Type \quad (1)$$

де $Id \subset Z_+ \cup \{0\}$ - множина семантичних чисел деякого атрибуту, $Type$ – множина значень типу даних. $P (Type)$ – булеан множини значень типу даних.

Таким чином, вектор $attr \in Attr$ містить повний опис усіх можливих змінних будь-яких типів даних. При цьому опис типу, саме як множини значень, дозволяє досить широко формулювати типи атрибутів. Але для множини $Type$ завжди виконується співвідношення $Type \subset Z$. Знак суворого включення означає, що тип, у загальному випадку, не охоплює всієї множини цілих чисел. При цьому, якщо тип символний, під цілим числом мається на увазі код символу у кодовій таблиці

Для моделювання таких структур даних, як масиви, формулу (1) необхідно розширити, включивши у неї, відповідно індекс масиву:

$$Attr = Id \times Index \times P (Type) \times Type \quad (2)$$

де $Id \subset Z_+ \cup \{0\}$ - множина семантичних чисел деякого атрибуту, $Type$ – множина значень типу даних. $P (Type)$ – булеан множини значень типу даних, $Index = \{i : i \in Z \text{ та } i \geq 0\}$ – множина можливих значень індексів для масивів.

Семантичні числа визначаються наступною формулою

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} const_{ctx}^0 \\ \vdots \\ const_{ctx}^{i-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

де c_1, \dots, c_n – цілі числа з множини цілих чисел від 1 до n , що відповідають символам, які використовуються під час формулювання елементів множини Id . $const_{ctx}$ – константа контексту, яка встановлюється рівною $n+1$ та відіграє роль ваги розряду системи числення.

Фактично, семантичне число являє собою десятковий еквівалент слова, якщо його представляти як число у системі числення. Семантичне число «0» позначає константне значення деякого типу даних, без якогось його тлумачення. Прикладом такого випадку є, наприклад число 3,14 без додаткового зазначення, що це наближення константи « π ».

Сформулюємо логіко-функціональну модель атрибуту. Вимогою до семантичного числа атрибуту є додатність цього числа. Введемо у розгляд одномісний предикат P_0 , який має наступну область істинності: $P_0 = \{(id, i, T, t) : id \in Id \text{ та } id > 0\}$. Це визначення базується на векторі $(id, i, A, t) \in Attr$, де $id \in Id$, $i \in Index$, T – це множина значень типу даних, $t \in T$ – конкретне значення типу.

Вимогу щодо індексу декартового добутку атрибутів визначимо за допомогою предикату P_{index} , область істинності якого визначається на множині $Attr$. наступним чином $P_{index} = \{(id, i, A, t) : i \in Z \text{ та } i \geq 0\}$, де $(id, i, A, t) \in Attr$.

Введемо у розгляд предикат для визначення того факту, що тип даних заданий. Це означає, що третій компонент вектору не є пустою множиною. Це формулюється за допомогою предикату P_{type} із наступною областю істинності: $P_{type} = \{(id, i, A, t) : A \neq \emptyset\}$. Звернемо увагу, що при представленні за допомогою цієї моделі нетипізованих мов програмування ця множина не буде пустою. Множина A буде визначатися, як множина усіх можливих значень змінної. Вимога до четвертого компоненту вектора, яка полає у приналежності значення множині, яка є третьою компонентою, сформулюємо у вигляді предикату $P_t = \{(id, i, A, t) : t \in A\}$

Додатково визначимо двомісний предикат рівності семантичних чисел атрибутів, який визначається за наступною формулою: $P_{sem} : Attr^2 \rightarrow \{0; 1\}$. Область істинності цього предикату має наступну характеристичну властивість: $\{(attr_1; attr_2) : np_1 attr_1 = np_1 attr_2\}$. За аналогією визначимо двомісні предикати рівності індексів (P_{eqi}), типів (P_{eqt}) та значень (P_{eqv}). Єдина відмінність від визначення предикату P_{sem} полягає в тому, що для P_{eqi} використовується друга проекція вектору атрибута, для P_{eqt} – третя, для P_{eqv} – четверта.

Таким чином, сформульована наступна логіко-функціональна модель для задачі

$$M_{attr} = (Attr, \{P_0, P_{index}, P_{type}, P_t, P_{eqi}, P_{eqt}, P_{eqv}\}) \quad (4)$$

Сигнатуру предикатів цієї логіко-функціональної моделі будемо позначати P .

Оскільки поняття змінної співпадає з поняттям одно елементного масиву з мінімальним значенням індексу, надалі для опису атрибуту будемо використовувати формулу (2).

Надалі введемо у розгляд багатоосновну алгебру атрибутів. Основами цієї алгебри будуть множина $Attr$ та множина цілих чисел. Визначимо операції на цій алгебрі

Додаванням значення атрибутів будемо називати операцію $\varphi_a : Attr^2 \rightarrow Attr$. Оскільки цій бінарній операції можна поставити у відповідність тернарне відношення, із наступною породжуючою функцією:

$$\{(attr_1, attr_2, attr_3) : np_4 attr_3 = np_4 attr_2 + np_4 attr_1\} \quad (5)$$

де $attr_1, attr_2, attr_3 \in Attr$ – елементи множини елементарних атрибутів, np_4 – взяття четвертої проекції цих векторів.

Таким чином, формула (5) задає багатовимірну таблицю Келі для операції φ_a .

Визначимо також функцію додавання константи до значення атрибуту $\varphi_{ac} : Attr \times Z \rightarrow Attr$, яка визначається за наступною формулою

$$\{(attr_1, z, attr_2) : pr_4 attr_2 = pr_4 attr_1 + z\} \quad (6)$$

За аналогією з операцією суми атрибутів φ_a визначимо операцію множення атрибутів $\varphi_m : Attr^2 \rightarrow Attr$

$$\{(attr_1, attr_2, attr_3) : pr_4 attr_3 = pr_4 attr_2 * pr_4 attr_1\} \quad (7)$$

де $attr_1, attr_2, attr_3 \in Attr$ – елементи множини елементарних атрибутів, pr_4 – взяття четвертої проекції цих векторів.

Введемо у розгляд операцію множення на константу значення атрибуту $\varphi_{mc} : Attr \times Z \rightarrow Attr$. Таблиця Келі для неї буде визначатися за наступною характеристичною властивістю:

$$\{(attr_1, z, attr_2) : pr_4 attr_2 = pr_4 attr_1 * z\} \quad (8)$$

Також введемо у розгляд операцію ототожнювання індексу. Функція виду $f : Attr \times Z \rightarrow Attr$, яка характеризує ототожнювання індексу, задається наступною характеристичною властивістю:

$$\{(attr_1, z, attr_2) : pr_1 attr_1 = pr_1 attr_2 \ \& \ pr_2 attr_2 = z\} \quad (9)$$

Операцію зміщення індексу $g : Attr \times Z \rightarrow Attr$ задається за допомогою наступної відповідності

$$\{(attr_1, z, attr_2) : pr_1 attr_1 = pr_1 attr_2 \ \& \ pr_2 attr_2 = pr_2 attr_1 + z\} \quad (10)$$

Отже, оскільки тип даних є, загалом, абстрактною багатоосновною алгеброю задамо багатоосновну алгебру атрибутів наступним чином

$$A_{\square\square\square} = (Attr, Z, \{\varphi_a, \varphi_m, \varphi_{mc}, \varphi_{ac}, f, g\}) \quad (11)$$

де $Attr$ – множина атрибутів предметної області, Z – множина цілих чисел, φ_0 – операція додавання значень атрибутів, φ_m – операція множення значень атрибутів, f – операція ототожнювання індексу, g – операція зміщення індексу.

Операції, які вказані у сигнатурі алгебри (6) будемо вважати базовими операціями у мовнонезалежній моделі програмного коду. Сама алгебра (6) описує, з точки зору програмування, тип даних який будемо називати токен предметної області.

Надалі, для опису дій потрібно розширити багатоосновну алгебру (9) теоретико-множинними операціями над булеаном атрибутів. Тоді ця багатоосновна алгебра матиме наступний вигляд:

$$A_{\square\square\square} = (Attr, Z, P(Attr), \{\varphi_a, \varphi_m, \varphi_{mc}, \varphi_{ac}, f, g, \setminus, \cup\}) \quad (12)$$

Теоретико-множинні операції об'єднання та різниці у цьому визначенні застосовуються до булеану атрибутів. Сигнатуру операцій цієї багатоосновної алгебри складають операції алгебри (9), а також теоретико-множинні операції об'єднання та різниці.

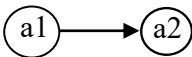
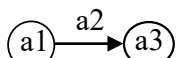
Багатоосновна алгебра (10) та логіко-функціональна модель (4) поєднаємо у багатоосновну алгебраїчну систему, в якій у якості основи буде використано основу алгебри (10), в якості сигнатури операцій виступає сигнатура алгебри (10), а в якості сигнатури предикатів – сигнатура логіко-функціональної моделі (4), яка додатково розширена предикатом рівності множин, який визначено на булеані $P(Attr)$

Розробка мовнонезалежної моделі представлення програмного коду

Відомо, що будь-яка n-арна операція може бути описана n+1-арним відношенням. Зокрема, унарна операція описується бінарним відношенням, а бінарна операція – відношенням арності три. У всіх випадках, остання компонента вектора є результатом операції.

Таблиця 2

Правила представлення операцій у вигляді графу

Операція	Тип відношення	Елемент у відношенні	Вид ребра графу
Унарна	Бінарне	$(a_1; a_2)$	
Бінарна	Тернарне	$(a_1; a_2; a_3)$	

З іншого боку бінарне відношення може бути представлене, як ребро графу, яка поєднує дві вершини, а бінарну операцію можна представити як навантажене ребро графу. Правила цього представлення, що надалі використовуються наведені у таблиці 2

Також, кожному ребру зіставимо у відповідність тип ребра, значення якого вибирається з множини, що є об'єднанням сигнатури операцій та сигнатури предикатів алгебраїчної системи (10). Фактично,

сигнатура предикатів та сигнатура операцій є множиною можливих типів ребер. Отже маємо надалі розглядати навантажений мультиграф.

Кожну вершину пропонованого мультиграфу опишемо наступним рівнянням:

$$V = I \times P(Attr) \quad (13)$$

де $I \subseteq Z$ – ідентифікатор вершини (ціле число), $P(Attr)$ – усі можливі набори токенів предметної області, які визначаються за формулою (2).

Вектор $v \in V$ складається з двох компонентів. Перша проєкція – номер вершини, друга містить набір значень для предметної області, або пусту множину

Множина V відіграє роль універсальної множини для вершин графів. Ідентифікатор вершини грає роль постійної унікальної константи для цієї вершини та дозволяє зробити структуру графу незмінною.

Універсальна множина ребер цього мультиграфу описується за формулою:

$$E = V^2 \times Attr \times Type \quad (14)$$

Де V – множина вершин графу, яка визначається формулою (13). Множина $Attr$ – множина атрибутів, $Type$ – тип вершини, $Type = P \cup \Omega$.

Для подальшого вирішення задачі введемо у розгляд алгебру Дейкстри [6], яка у якості основ містить сигнатуру предикатів та операцій, які визначено логіко-функціональній моделі (4) та у багатоосновній алгебрі (10), а як сигнатуру операцій відомі алгоритмічні операції композиції, альтернативи та циклу. Розглянемо побудову операцій композиції, альтернативи та циклу у вигляді такого мультиграфу.

Композиція операцій у алгебрі Дейкстри є узагальненням відомої операції композиції на випадок цієї алгебри. Вона позначає послідовне виконання операцій без додаткових умов. Результат першої операції є входними даними для другої операції. Приклад визначення двох операцій на графі наведено на рис.1



Рис. 1. Представлення послідовного виконання операцій

На рис. 1 позначено граф, який містить три вершини $a_1, a_2, a_3 \in V$. Індеси позначають перший компонент вектору. Другий компонент – пуста множина. Обидва ребра мають тип «операція» (тип Ω). Присвоєння ребрам номерів відбувається за будь-яким довільним алгоритмом обходу графа.

Наступним елементом є елемент умови, та частковий його випадок – цикл. Будь-яка умовна дія складається з перевірки умови (ребро має тип P) та одразу після нього виконання однієї чи декількох дій (послідовність ребер типу Ω). Приклад опису найпростішого умовного оператора на графі наведений на рис 2

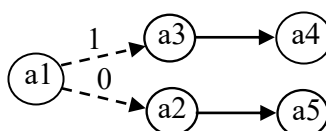


Рис. 2. Представлення умови на графі

Пунктиром позначено ребра типу P , суцільною лінією – ребра типу Ω . Символ «1» над ребром типу P позначає істинне значення предикату, символ «0» – хибне значення предикату. Нумерація здійснюється так само, як і у випадку послідовного виконання операцій.

Представлення циклів на цьому графі відбувається аналогічно умовному оператору. У випадку циклу з постумовою, предикатне ребро, яке відповідає хибному оператору одночасно здійснює повернення до вершини, з якої починається операторне ребро початку циклу(рис.3)

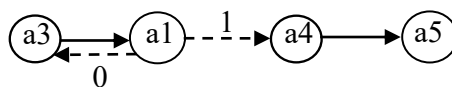


Рис. 3 Представлення циклу на графі

У випадку циклу з передумовою, ребро, яке відповідає останньому оператору циклу здійснює повернення на ребро визначення умови, а хибне ребро розпочинає цикл. Вихід з циклу здійснюється за допомогою істинного предикатного ребра (рис.4)

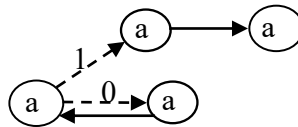


Рис. 4 Представлення циклу із передумовою

Представлення всіх алгебраїчних записів базових алгоритмічних фрагментів на графі дозволяє формально представити за допомогою методів трансляції, будь який код процедури у мові програмування в уніфікованому вигляді, незалежно від синтаксичних особливостей мови програмування. Але існує проблема представлення програмного коду, у якому є багато різних процедур, а також представлення взаємодії цих процедур. У алгебро алгоритмічному підході це вирішується за допомогою клонів – алгебр, що містять у якості основи операції деякої алгебри, а у якості сигнатури – єдину операцію суперпозиції (підстановки) операцій. З точки зору коду програмного забезпечення, суперпозиція є викликом процедури програмного коду.

Введемо у розгляд поняття початкової вершини, як вершини, з якої виходить ребро, що відповідає першому операторному виклику у програмі. Так само, заключною вершиною буде вершина, до якої входить ребро заключного оператора чи операції програми.

Враховуючи це, операція суперпозиції може бути представлена за допомогою введення графу шарів. Кожному шару у цьому графі однозначно відповідає граф, який побудовано для схем алгебри Дейкстри. До ребер графу шарів пред'являються наступні вимоги: одне ребро поєднує довільну вершину на одному шарі зі стартовою вершиною, друге ребро поєднує заключну вершину одного шару з довільним ребром на іншому шарі. Слід зазначити, що, враховуючи зміст та аргументи операції суперпозиції, ці ребра є окремим типом ребер – ребра-виклику. Приклад такого графу наведено на рис. 5

На ребрах, які поєднують різні шари може бути визначене введення локальних змінних за допомогою теоретико-множинних операцій об'єднання та різниці. Першим аргументом цих операцій є друга проекція початкової вершини ребра, яке з'єднує шари. Другим аргументом є множина локально визначених атрибутів, які будуть використані під час виконання дії.

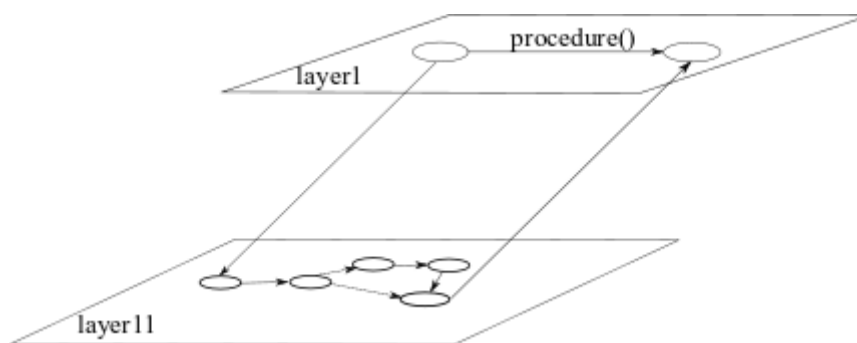


Рис. 5 Представлення процедури

Якщо, наприклад, процедура (див. рис 5) має декілька реалізацій, то вони розташовуються на окремих дочірніх шарах, які безпосередньо пов'язані із 'layer1'. В цьому випадку для дочірніх шарів можуть зазначатися окремі ідентифікатори та додаткова інформація (наприклад, частота викликів саме цієї реалізації). Слід зазначити, що мультишарове представлення можливе лише для операторних ребер. При цьому вершини, які поєднує ребро мають послідовні номери.

Побудоване представлення у вигляді графу дозволяє вирішити ще одну важливу проблему, яка існує у моделі. У векторі атрибутів немає можливості представити дробові числа. Це пов'язано із тим, що дробові числа у сучасних обчислювальних системах утворюються за допомогою внутрішніх алгоритмів обробки цілочисельних масивів даних. Застосування багатшарової моделі (див. рис. 6) дозволяє представити дробові числа саме у тому вигляді, у якому вони обробляються у обчислювальній системі. У цьому випадку процедурою є виконання будь-яких арифметичних дій над цими числами. Представлення символів у обчислювальній системі є так само алгоритмом, який ставить у відповідність цілому числу зображення відповідного символу. Цей алгоритм так само може бути побудований за допомогою багатшарового представлення (див. рис. 6)

Побудова мовнонезалежного репозиторію програмного коду

Запропонована модель у вигляді багатшарового графу дозволяє побудувати мовнонезалежний репозитарій програмного коду. Він буде базуватися на представленні програмного коду у вигляді розробленого багатшарового графу.

Діаграма пакетів для представленого репозитарію наведено на рис.6 .

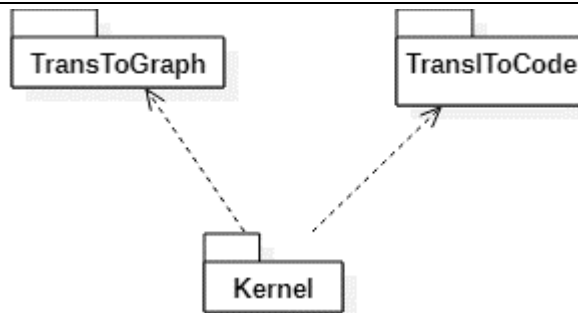


Рис. 6 Діаграма пакетів для мовнонезалежного репозитарію програмного коду

Модуль TransToGraph призначений для побудови транслятора представлення програмного коду у графову форму представлення. Блок TranslToCode призначений для переведення графової форми представлення у представлення у вигляді програмного коду. Блок Kernel призначений для виконання операцій з імітаційного моделювання на розробленій графовій моделі.

Діаграма класів для модуля Kernel наведено на рис. 7

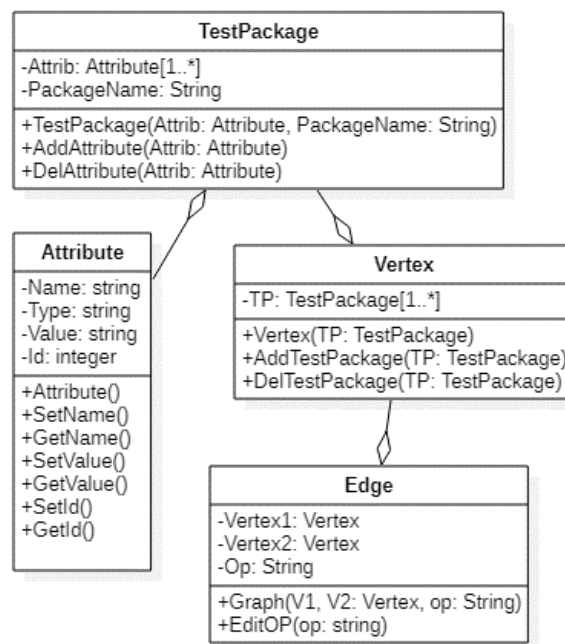


Рис. 7. Діаграма класів для модуля kernel

Модуль Kernel складається з класів Attribute, TestPackage, Vertex, Edge. Клас Attribute представляє собою атрибут предметної області, що моделюється. Ці атрибути об'єднуються у тест-пакети, які представлені класом TestPackage. Відповідно до розглянутої моделі тест-пакети знаходяться у вершині графу, що показано на діаграмі класів як об'єкт класу Vertex. Вершини з'єднуються між собою ребрами різних типів, які представлені як клас Edge

Модулі TransToGraph та TranslToCode призначені відповідно для переведення коду у представлення у вигляді графу і представлення графу у відповідний фрагмент програмного коду. Трансляція графу у програмний код здійснюється за допомогою алгоритмів обходу графу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі розглянуто побудову моделі для репозитарію програмного коду, який дозволяє зберігати рішення задач у мовнонезалежному форматі графу та додавати до рішення назви процедур на природній мові.

У статті побудовано мовнонезалежну модель представлення програмного коду у вигляді графу. Побудовано математичне представлення для природномовного інтерфейсу репозитарія. Використання цього репозитарія дозволяє систематизувати рішення задач та дозволити автоматизовано побудувати програмний код для рішення задачі

Література

1. Осколков А. П. Сети Петри – инструмент для описания и исследования динамических систем [Електронний ресурс] / А. П. Осколков // Системи обробки інформації. - 2014. - Вип. 6. - С. 149-151. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2014_6_37

2. Шостак И. В. Метод расширения модели логистической цепи поставок, представленной в форме двухуровневой вложенной сети Петри [Электронный ресурс] / И. В. Шостак, Я. Рахими // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. - 2019. - № 1. - С. 82–90. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2019_1_11
3. Крытый С. Л. Конечные автоматы в информационных технологиях [Электронный ресурс] / С. Л. Крытый // *Кибернетика и системный анализ*. - 2011. - Т. 47, № 5. - С. 3-20. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KSA_2011_47_5_3
4. Поляков М. А. Конечные автоматы с небинарными элементами множеств [Электронный ресурс] / М. А. Поляков, И. А. Андриас // *Системні технології*. - 2019. - Вип. 2. - С. 85-94. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/st_2019_2_12
5. И.В. Вельбицкий Визуальное программирование графическими структурами [Заголовок з екрану]. – режим доступа <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/e72abd849fe68a7dc32576eb0034c090>
6. Цейтлин Г. Е. Алгебро-алгоритмические средства проектирования знаний предметных областей / Г. Е. Цейтлин, Л. М. Захария // *Кибернетика и системный анализ*. - 2009. - Т. 45, № 6. - С. 13-23. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KSA_2009_45_6_3

References

1. Oskolkov A. P. Sety Petry – ynstrument dlia opysanyia y yssledovanyia dynamycheskykh system [Elektronnyi resurs] / A. P. Oskolkov // *Systemy obrobky informatsii*. - 2014. - Vyp. 6. - S. 149-151. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2014_6_37
2. Shostak Y. V. Metod rasshyreniia modely lohystycheskoi tsepy postavok, predstavlennoi v forme dvukhurovnevoi vlozhennoi sety Petry [Elektronnyi resurs] / Y. V. Shostak, Ya. Rakhymy // *Radioelektronni i kompiuterni systemy*. - 2019. - № 1. - S. 82–90. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2019_1_11
3. Kryvyi S. L. Konechnye avtomaty v ynformatsyonnykh tekhnolohiyakh [Elektronnyi resurs] / S. L. Kryvyi // *Kybernetyka y systemnyi analiz*. - 2011. - T. 47, № 5. - S. 3-20. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KSA_2011_47_5_3
4. Poliakov M. A. Konechnye avtomaty s nebynarnymy elementamy mnozhestv [Elektronnyi resurs] / M. A. Poliakov, Y. A. Andryas // *Systemni tekhnolohii*. - 2019. - Vyp. 2. - S. 85-94. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/st_2019_2_12
5. Y.V. Velbytskyi Vyzualnoe prohrammyrovanye hrafycheskymy strukturamy [Zaholovok z ekranu]. – rezhym dostupu <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/e72abd849fe68a7dc32576eb0034c090>
6. Tseitlyn H. E. Alhebro-alhorytmnycheskye sredstva proektyrovaniia znaniy predmetnykh oblastei / H. E. Tseitlyn, L. M. Zakharyia // *Kybernetyka y systemnyi analiz*. - 2009. - T. 45, № 6. - S. 13-23. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KSA_2009_45_6_3

МАМУТА М.С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-7674-4984>e-mail: rybalkomaryna@gmail.com

МАМУТА О.Д.

Інститут Фізики НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-6404-5879>e-mail: mamuta.aleksandr@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОКАНАЛЬНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ КОМПЛЕКСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ

Стаття присвячена дослідженню ефективності двоканальної оптико-електронної системи спостереження у складі телевізійного та тепловізійного каналів при комплексуванні інформації цих каналів за допомогою нейронних мереж. Увага зосереджена на оцінці ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта такою системою. Результати досліджень показують, що комплексування дозволяє підвищити ймовірнісні характеристики системи майже на 6% за сприятливих погодних умов.

Ключові слова: оптико-електронна система спостереження, комплексування, нейронні мережі

Maryna MAMUTA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Oleksandr MAMUTA

Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine

PERFORMANCE EVALUATION OF DUAL CHANNEL OPTOELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM WITH NEURAL NETWORK INFORMATION FUSION

Optoelectronic surveillance systems are widely used in many areas of human activity: in agriculture, medicine, military systems, in search and rescue operations. These systems are designed for space, airborne, ground and maritime applications. They have to work under all climate conditions with absolute certainty under all light and weather conditions. And on the other hand, they have to be cost effective. That's why optoelectronic surveillance systems use channels which provide complimentary information about the object and background. And for the most applications channels that operate in visible and thermal ranges of optical spectrum are indispensable element of such systems. Optoelectronic surveillance systems have to continuously meet and even exceed today's performance and reliability requirements. That's why there is a need to use not only cutting-age technology, but also adaptive signal processing. Information fusion is state-of-the-art technic to improve overall system performance. Numerous image fusion methods have been proposed during several decades but the most promising are neural networks.

Television system, which work in visible range of optical spectrum, and thermal system, which work in long-wave infrared range where chosen for the modeling. Probability of target detection, recognition and identification was used for performance evaluation. Probability of target detection, recognition and identification for separate long-wave infrared and television channels were modeled. Also, probabilities were estimated for the fused data. Information fusion was done with the help of convolutional neural networks. Simulation results showed that probability of target detection, recognition and identification are almost for 6% higher for fused data compared to separate channels.

Keywords: optoelectronic surveillance system, fusion, neural network

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогоднішній день оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС) стають невід'ємною частиною в багатьох сферах життєдіяльності людини. Вони містять в своєму складі різні канали в залежності від вирішуваної задачі, але для більшості систем характерна комбінація телевізійного (реєструє інформацію у видимому діапазоні електромагнітних хвиль) та тепловізійного (реєструє інформацію в далекому інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль) каналів. ОЕСС широко представлені на ринку.

Але умови сьогоднішнього вимагають все нового удосконалення ОЕСС і не лише за рахунок покращення елементної бази, вдосконалення схемотехнічних рішень, але й за рахунок використання передових методів обробки сигналів. Одним з таких сучасних методів є комплексування інформації, отриманої в різних каналах ОЕСС. В даній статті пропонується об'єднати інформативність телевізійного та тепловізійного каналів ОЕСС за допомогою згорткових нейронних мереж з подальшою оцінкою ефективності окремих каналів ОЕСС та системи з комплексуванням в цілому.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [1] розглянуто методи комплексування зображень на рівні пікселів із застосуванням нейронних мереж. В роботі [2] розглянуто методи комплексування видимих та інфрачервоних зображень.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження ефективності двоканальної ОЕСС при комплексуванні інформації, отриманої в телевізійному та тепловізійному каналах. За критерій якості обрано ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта.

Виклад основного матеріалу

Як відомо, телевізійний канал надає інформацію про фонову-цільову обстановку з високим просторовим розділенням, але є надзвичайно чутливим до погодних умов та рівня освітлення; інфрачервоний же діапазон фіксує власне теплове випромінювання об'єктів незалежно від умов функціонування. А, отже, об'єднання інформації цих двох каналів забезпечує більш достовірну картину фонову-цільової обстановки, в тому числі підвищує стійкість до штучних завад та маскувань.

Імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта знайдемо за формулою [3, 4]:

$$P_3(R) = \frac{\left(\frac{V(R)}{V_{50}(3)}\right)^E}{1 + \left(\frac{V(R)}{V_{50}(3)}\right)^E}, \quad (1)$$

де $V(R) = \frac{\sqrt{A_0 TTP}}{R}$ – число пар штрихів, що розміщуються на об'єкті; V_{50} – число штрихів, що

розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності правильного рішення залежно від змісту задачі; $E = 1,51 + 0,24[V(R)/V_{50}(3)]$ – емпірично визначена константа, що залежить від спектрального діапазону та відношення $V(R)/V_{50}$; TTP – показник успішності виконання задачі; A_0 – площа об'єкта; R – відстань від об'єкта до ОЕСС.

Згідно з формулою (1) імовірнісні характеристики ОЕСС залежать від показника успішності виконання задачі, який оцінює якість зображення на моніторі і визначається функцією передачі контрасту системи та контрастом об'єкта на дисплеї. Для знаходження функції передачі контрасту системи використаємо теорію лінійних систем, а отже і модуляційну передавальну функцію кожної ланки ОЕСС [5].

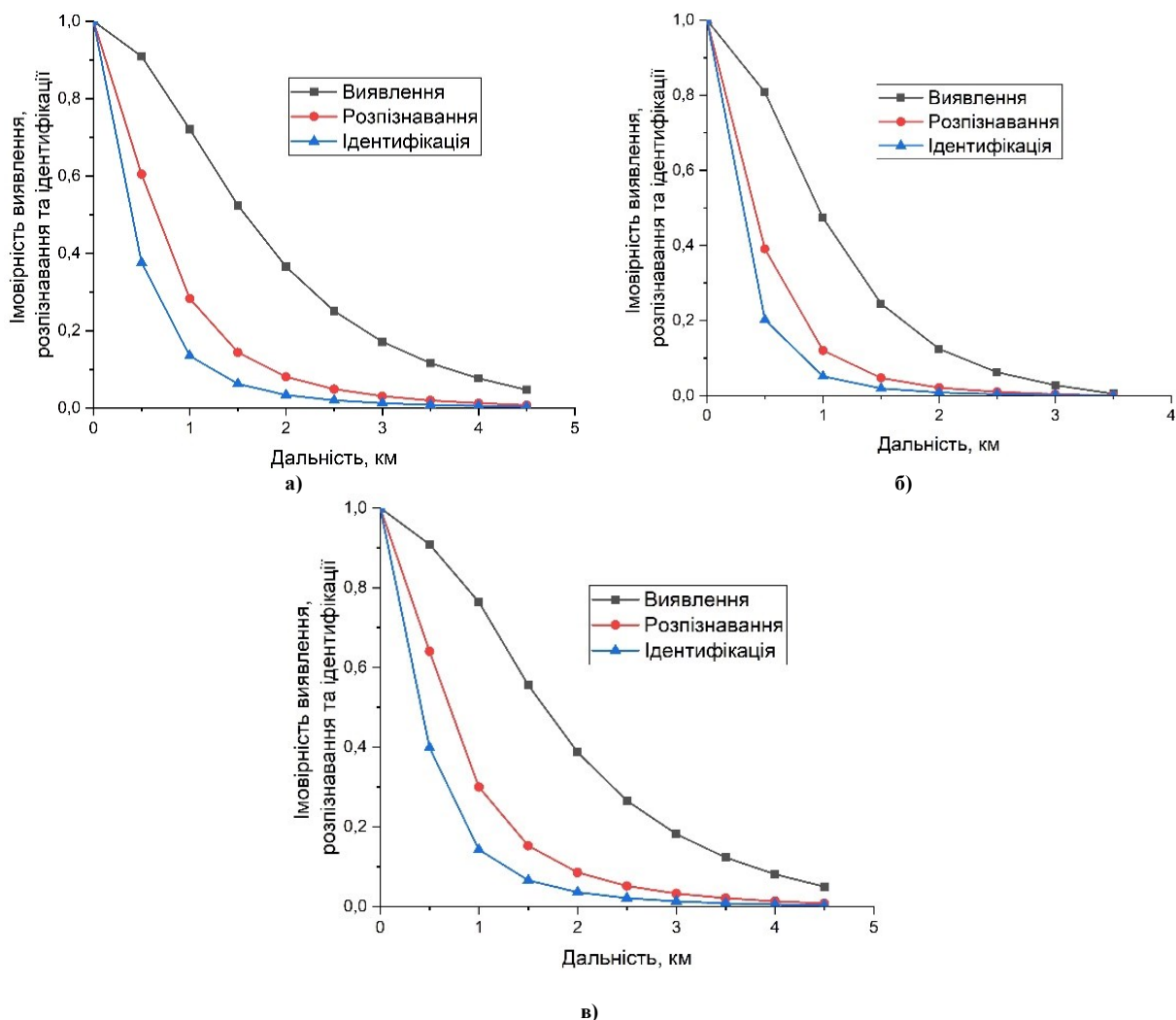


Рис. 1. Імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта: а) – для телевізійного каналу; б) – для тепловізійного каналу; в) – для ОЕСС з комплексуванням

Комплексування інформації телевізійного та тепловізійного каналів здійснюємо в декілька етапів. Спершу знаходимо унікальну інформацію для кожного каналу за допомогою нейронної мережі VGG-19 [6], після чого будемо карту інформативності використовуючи перетворення Softmax [7]. На основі отриманої карти інформативності здійснюємо власне комплексування.

А для визначення ефективності системи з комплексуванням інформації скористаємось методикою, запропонованою в [4].

Для моделювання об'єкта скористаємось стандартом НАТО 4347 [8], згідно з яким тест-об'єктом є АЧТ, що має розмір $2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$ з температурним контрастом $\Delta T = 2\text{К}$ на фоні температурою $T_b = 288\text{К}$.

Виходячи з технічних та масо-габаритних міркувань обираємо для тепловізійного каналу камеру TAU 2 [9], а для телевізійного каналу – Blackfly S [10] з оптичною системою фірми Edmund Optics (68215). Основні технічні характеристики наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики камер телевізійного та тепловізійного каналів

	Blackfly S	TAU 2
Розмір пікселя, мкм ²	6,9×6,9	17×17
Робочий спектральний діапазон, мкм	0,42-0,76	7,5-13,5
Формат	720×540	640×512
Еквівалентна шуму різниця температур, мК	-	30
Фокусна відстань, мм	8,5	13
Відносний отвір	f/1.4	f/1.0

Результати розрахунків показано на рис. 1.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Результати моделювань показують, що комплексування інформації з використанням нейронних мереж дозволяє підвищити ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта двокаранальною ОЕСС за сприятливих погодних умов майже на 6%.

Подальші дослідження будуть присвячені визначенню ефективності роботи багатоканальних ОЕСС при використанні нейронних мереж для комплексування інформації, отриманої в її каналах.

Література

1. Liu Yu. Deep learning for pixel-level image fusion: Recent advances and future prospects / Yu Liu, Xun Chen, Zengfu Wang, Z. Jane Wang, Rabab K. Ward, Xuesong Wang // Information Fusion. – 2018. – Vol. 42. – P. 158-173. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.10.007>.
2. Ma Jiayi. Infrared and visible image fusion methods and applications: A survey / Jiayi Ma, Yong Ma, Chang Li // Information Fusion. – 2019. – Vol 45. – P. 153-178. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.02.004>.
3. Vollmerhausen R.H. Analysis and evaluation of sampled imaging systems / R.H. Vollmerhausen, D. Reago, R.G. Driggers. – Washington: SPIE Press, 2010. – 304 p.
4. Колобродов В. Г. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, М. С. Мамута // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 6. – С. 127–131.
5. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance / Gerald C. Holst. – [5th ed.]. – Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2008. – 438 p. – ISBN 978-0964000063.
6. Raj A. Handbook of research on deep learning-based image analysis under constrained and unconstrained environments / Alex Noel Joseph Raj, Vijayalakshmi G. V. Mahesh, Ruban Nersisson. – Hershey, PA: Engineering Science Reference, 2021. – 381 p. – ISBN 9781799866923.
7. Goodfellow I. Deep learning / Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. – Cambridge, MA: MIT Press, 2017. – 800 p. – ISBN 978-0262035613.
8. STANAG 4347: NATO standardization agreement: definition of nominal static range performance for thermal imaging systems. – 1995. – 14p.
9. TAU 2. Проспект фірми Teledyne FLIR, США. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.flir.com/products/tau-2/>
10. Blackfly S. Проспект фірми Teledyne FLIR, США. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.flir.com/products/blackfly-s-usb3/>

References

1. Liu Yu. Deep learning for pixel-level image fusion: Recent advances and future prospects / Yu Liu, Xun Chen, Zengfu Wang, Z. Jane Wang, Rabab K. Ward, Xuesong Wang // Information Fusion. – 2018. – Vol. 42. – P. 158-173. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.10.007>.
2. Ma Jiayi. Infrared and visible image fusion methods and applications: A survey / Jiayi Ma, Yong Ma, Chang Li // Information Fusion. – 2019. – Vol 45. – P. 153-178. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.02.004>.

3. Vollmerhausen R.H. Analysis and evaluation of sampled imaging systems / R.H. Vollmerhausen, D. Reago, R.G. Driggers. – Washington: SPIE Press, 2010. – 304 p.
4. Kolobrodov V. G. Otsinka efektyvnosti bahatokanalnykh optyko-elektronnykh system sposterezhennia z kompleksuvanniam informatsii / V. G. Kolobrodov, V. I. Mykytenko, M. S. Mamuta // Naukovi visti NTUU “KPI”. – 2012. – № 6. – S. 127–131.
5. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance / Gerald C. Holst. – [5th ed.]. – Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2008. – 438 p. – ISBN 978-0964000063.
6. Raj A. Handbook of research on deep learning-based image analysis under constrained and unconstrained environments / Alex Noel Joseph Raj, Vijayalakshmi G. V. Mahesh, Ruban Nersisson. – Hershey, PA: Engineering Science Reference, 2021. – 381 p. – ISBN 9781799866923.
7. Goodfellow I. Deep learning / Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. – Cambridge, MA: MIT Press, 2017. – 800 p. – ISBN 978-0262035613.
8. STANAG 4347: NATO standardization agreement: definition of nominal static range performance for thermal imaging systems. – 1995. – 14p.
9. TAU 2. Prospekt firmy Teledyne FLIR, SShA. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.flir.com/products/tau-2/>
10. Blackfly S. Prospekt firmy Teledyne FLIR, SShA. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.flir.com/products/blackfly-s-usb3/>

БОЙКО С. М.

Національний університет "Запорізька політехніка"

ЩОКІН В. П.

Криворізький національний університет

ВИШНЕВСЬКИЙ С. Я.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»

ДАНІЛІН О. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»

ПОДГОРНИХ Н. В.

Кременчуцький льотний коледж Харківського університету внутрішніх справ

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ ПРИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМИ ЇХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Метою даної роботи є синтез особливостей прогнозування електроспоживання підприємств авіаційної галузі при впровадженні до системи їх електропостачання джерел розосередженої генерації. На авіаційних підприємствах актуальним є впровадження в загальну структуру систем електроживлення розосередженої генерації. Для прогнозування, з достатнім рівнем вірогідності, електроенергоспоживання авіаційних підприємств необхідно вирішити багатокритеріальну задачу. Застосування нейронних мереж в системах прогнозування електроенергетичних параметрів дозволить забезпечити багатофакторне прогнозування. Такий підхід дозволить покращити прогнозованість згенерованої електроенергії розосередженою генерацією в часі, що зменшить в свою чергу, похибку прогнозу електроспоживання з мережі в умовах цих підприємств. Запропонована структурна схема визначення прогнозних показників енергоспоживання із мережі авіаційного підприємства, при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств джерел розосередженої генерації, для подальшої реалізації прогнозної моделі.

Ключові слова: розосереджена генерація, електропостачання, прогнозування електроспоживання, штучні нейронні мережі.

Sergii BOYKO

Zaporizhzhya Polytechnic National University

Vadim SHCHOKIN

Kryvyi Rih National University

Sviatoslav VYSHNEVSKY, Olexsander DANILIN

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after I. Sikorsky"

N. PODGORNYYKH

Kremenchug Flight College of Kharkiv University of Internal Affairs

FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION OF AVIATION ENTERPRISES DURING RECONFIGURATION OF THEIR POWER SUPPLY SYSTEM

The purpose of this work is the features of forecasting the electricity consumption of aviation companies in their introduction into the power supply system of sources of dispersed generation. At aviation enterprises, the introduction of dispersed generation power supply systems into the general structure is important. To predict, with a sufficient level of probability, the energy consumption of aviation enterprises, it is necessary to solve a multi-criteria problem. The use of neural networks in systems for forecasting energy parameters allows the use of multifactorial forecasting. This approach will improve the forecasting of generated electricity by distributed generation over time, which in turn will reduce the error of the forecast of electricity consumption from the grid in the conditions of these enterprises. The structural scheme of determination of forecast indicators of energy consumption from the network aviation enterprise, introduced into the structure of power supply of these enterprises of sources of dispersed generation, for further realization of the forecast model is offered.

Keywords: distributed generation, power supply, power consumption forecasting, artificial neural networks

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В контексті Авіаційної стратегії України з посеред інших, мають бути вирішені завдання підвищення рівня безпеки авіаційного транспорту та розвиток авіаційних перевезень. Між тим, аналіз стану авіаційної галузі показує необхідність її модернізації та реорганізації. У тому числі є необхідність підвищення надійності електропостачання об'єктів авіаційних підприємств.

На сьогоднішній день, децентралізовані енергосистеми можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів [1].

Україна має потужні ресурси розосередженої генерації (РГ). Експлуатація різних типів РГ, у тому числі відновлюваних джерел електричної енергії, є ефективною практично на всій території України [1].

Водночас, аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, що обумовлює в цілому актуальність вивчення питання особливостей прогнозування електроспоживання з мережі в умовах підприємств та актуальності застосування при цьому комбінованого підходу, особливо при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств сучасних енергетичних установок РГ різних типів [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У ряді попередніх досліджень автори обґрунтовують позитивний ефект від впровадження джерел РГ в умовах промислових підприємств. Між тим, ці об'єкти, а це в масштабах України сотні гектарів, по всіх своїх параметрах можуть стати об'єктами для розміщення комплексів РГ. Це мають стати, міні- або мікроелектростанціями в структурах систем електропостачання підприємств авіаційної галузі України [2-10].

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є дослідження особливостей та механізму прогнозування електроспоживання авіаційних підприємств при використанні джерел РГ.

Формулювання цілей статті

Головною метою цієї роботи є синтез особливостей прогнозування електроспоживання авіаційних підприємств при впровадженні до системи їх електропостачання джерел розосередженої генерації.

Виклад основного матеріалу

Аналіз впровадження джерел РГ у складі енергетичних систем авіаційних підприємств було виявлено, що джерела РГ впливають на розподільні мережі цих підприємств та перетворюють їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін у прийнятті стратегії управління розподільними мережами підприємства та планування структури і режимів локальних енергетичних систем. [4].

До складу запропонованої системи електропостачання РГ входить наступне устаткування: вітроенергетична станція (ВЕС), сонячна електростанція (СЕС), та інші джерела електричної енергії; батарея акумуляторів, що служить для накопичення електроенергії при роботі джерел РГ для живлення системи її управління (або, за необхідності, як резервне джерело живлення); перетворювальна апаратура, у випадку використання генератора змінної напруги, що служить для перетворення електроенергії від РГ у постійний струм для живлення інвертора й заряду акумуляторних батарей і постійного струму від акумуляторів напруги змінного струму зі стандартними параметрами (рис. 1).

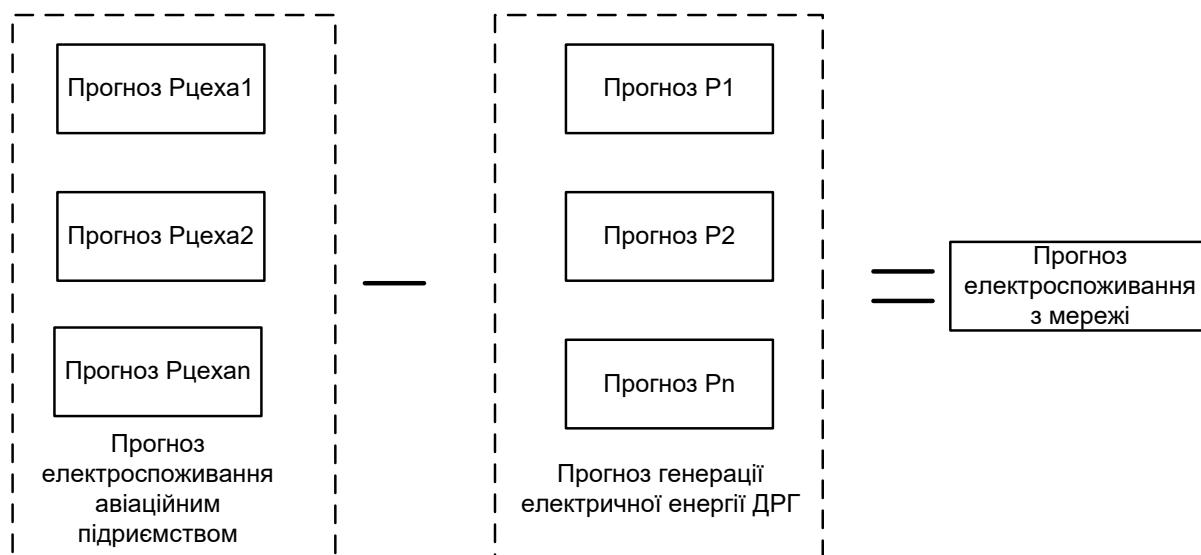


Рис. 1 Структурна схема визначення прогнозних показників енергоспоживання із мережі авіаційного підприємства, при впровадженні в структуру електропостачання джерел розосередженої генерації

Аспекти електроспоживання підприємств авіаційної галузі залежать від багатьох факторів, що безумовно ускладнює завдання оперативного точного прогнозування з мінімальним відсотком похибки. Тому для вирішення поставленої задачі слід використовувати штучних нейронних мереж (ШНМ), які передбачають наявність суттєвих зв'язків між окремими факторами.

Нейрони слабо зв'язаних ШНМ розміщуються у вершинах прямокутної або гексагональної решітки, а кожний нейрон буде зв'язаний із чотирма сусідніми нейронами (окіл фон Неймана) або із шістьма сусідніми нейронами (окіл Голея), або із 8-ма сусідніми нейронами (окіл Мура) [2].

ШНМ по відношенню від типу функцій активації, які входять до структури ШН поділяють:

- 1) гомогенні ШНМ, які складаються із нейронів одного типу із єдиною функцією активації;
- 2) гетерогенні ШНМ, які складаються з нейронів із різними функціями активації.

ШНМ, в залежності від стану, в якому знаходяться нейтрони, поділяють на аналогові і бінарні, а в залежності від кількості нейронів, які змінюють свій стан в деякий момент часу, поділяють на: синхронні ШНМ, коли лише один нейрон змінює свій стан; асинхронні, коли свій стан змінює декілька нейтронів (група нейронів).

Функціонування ШНМ базується на подачі функцій багатьох змінних як суми функцій однієї змінної.

Найпростіша ШНМ складається з певної кількості ШНМ, які об'єднують у групи, які утворюють шари,

нейрони яких ваговими зв'язками з'єднуються і вхідними сигналами від інших нейронів, попередніх шарів.

В результаті перетворень вхідних сигналів у нейронах певних слоїв на виході із ШНМ одержують сигнал ОВТ.

Вагові коефіцієнти можна записати у вигляді матриці, яка має m рядків та n стовпчиків:

$$W = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{m1} & \omega_{m2} & \dots & \omega_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де m – кількість входів, n – кількість нейронів ШНМ.

Тоді вихідний вектор \vec{B} , елементами якого є виходи сигналів ОВТ із вихідних нейронів, обчислюють як матричний добуток матриці-рядка \vec{X} -вхідних елементів на матрицю \vec{W} вагових коефіцієнтів:

$$\vec{B} = \vec{X}\vec{W}, \quad (2)$$

де \vec{B} – вектор-рядок.

Якщо потрібний вихід із i -го нейрона позначити y_i , а реальний вихід із i -го нейрона позначити \hat{y}_i , тоді похибку для k -го зразка можна обчислити за формулою:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad i = 1, n. \quad (3)$$

тоді загальна похибка для всієї виборки:

$$\Delta E_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n E_k, \quad k = 1, m. \quad (4)$$

Комбінований (сумарний) вхід до даного нейрона визначає його збудженість (активність), тобто сумарне значення вагових зв'язків, які впливають на даний нейрон, визначає реальний стан нейрона [5].

Для одного зразка, при лінійній функції активації сигналу у нейроні, похибку можна визначити за формулою:

$$E = \frac{1}{2} (y_i - \hat{y})^2 = \frac{1}{2} (y_i - NET)^2. \quad (5)$$

Перетворивши даний вираз одержимо:

$$E = 0,5(y_i^2 - 2y_i\hat{y} + \hat{y}^2) = 0,5[y_i^2 - 2y_i(NET) + (NET)^2].$$

Так як $\hat{y} = (NET) = (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)$ для двох вагових зв'язків, тоді

$$\begin{aligned} E &= 0,5[y_i^2 - 2y_i(x_1\omega_1 + x_2\omega_2) + (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + (x_1\omega_1)^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + (x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + x_1^2\omega_1^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + x_2^2\omega_2^2]. \end{aligned}$$

Знайдемо залежність похибки E від ω_1 .

$$\begin{aligned} E(\omega_1) &= 0,5[x_1^2\omega_1^2 + (2x_1x_2\omega_2 - 2y_ix_1)\omega_1 + (y_i - 2y_ix_2\omega_2 + \omega_2^2x_2^2)] = \\ &= 0,5x_1^2\omega_1^2 + (x_1x_2\omega_2 - y_ix_1)\omega_1 + (0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2). \end{aligned}$$

Позначивши $0,5x_1^2 = a$, $x_1x_2\omega_2 - y_ix_1 = b$, $0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2 = c$, отримуємо:

$$E(\omega_1) = a\omega_1^2 + b\omega_1 + c. \quad (6)$$

Тобто залежність похибки E від ω_1 є параболічною, аналогічно залежність похибки E від ω_2 також буде параболічною. Так як $a = 0,5x_1^2 > 0$, то витки параболи направлені вгору (в додатному напрямку вісі E). А це означає, що графік залежності $E(\omega_1)$ має локальний мінімум, який співпадає із вершиною параболи, яка є графіком залежності $E(\omega_1)$ [6].

Так як вагові коефіцієнти на початковому етапі навчання ШНМ набирають деяких випадкових значень, тому точка, що характеризує початкове положення ШНМ у площині E, ω_1 може бути у довільному місці і малоімовірно, що буде знаходитись в точці локального мінімуму.

Отже, в процесі навчання ШНМ повинна проводити корекцію (зміну значень) вагових коефіцієнтів

так, щоб мінімізувати числове значення загальної похибки (E), тобто щоб $E \rightarrow E_{\min}$, причому цей процес повинний проходити якомога швидше, тобто за меншу кількість ітерацій і епох. Якщо E буде залежати від двох змінних (ω_1 і ω_2), то у просторовій декартовій системі координат (E, ω_1, ω_2) одержимо об'ємну фігуру обертання (параболоїд). Тобто одержимо поверхню, яка визначає величину похибки для різних комбінацій вагових коефіцієнтів (ω_1 і ω_2), а ваговий вектор, початок якого знаходиться у початку координат, а кінець у точці, якає проекцією локального мінімуму параболоїда на площину $\omega_1 \omega_2$, вказує напрямок мінімізації похибки [7].

Для корегування вагових коефіцієнтів можна застосувати правило Відроу–Хоффа або дельта – правило, ке в загальному вигляді має наступний математичний запис:

$$\Delta \omega_{ij} = \eta \delta_j x_i, \quad (7)$$

де $\delta_j = y_j - \hat{y}_j$ – потрібний вихід із нейтрона j , а \hat{y}_j – фактичний (реальний) вихід із j -нейтрона, x_i – сигнал, який прийшов від i -нейтрона, η – коефіцієнт зміни вагових коефіцієнтів (норма навчання), $\Delta \omega_{ij}$ – величина зміни вагового коефіцієнта зв'язку між i та j нейтроном.

В загальному вигляді дельта правило можна записати у вигляді:

$$\Delta \omega_{ij} = \eta \delta_j x_i = \eta (y_j - \hat{y}_j) x_i = \eta (y_j - \sum_{j=1}^m x_i \omega_{ij}) x_i. \quad (8)$$

Швидкість зміни похибки $\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_i}$ відносно зміни реального виходу із j -нейтрона чисельно рівна:

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_i} = \hat{y}_j - y_j = -\delta_j, \quad (9)$$

а швидкість зміни виходу \hat{y}_j із j -нейтрона від зміни вагових коефіцієнтів $\Delta \omega_{ij}$ можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}} = x_i. \quad (10)$$

Тоді швидкість зміни похибки від зміни вагових коефіцієнтів можна записати:

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j} \frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}}, \quad (11)$$

$$-\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = -\delta_j x_i, \quad (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \delta_j x_i, \quad (13)$$

де $\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}}$ – похідна по поверхні похибок залежно від зміни вагових коефіцієнтів.

Тоді можна зробити висновок, що зміни вагових коефіцієнтів повинні відбуватися у напрямку, протилежному похідній по поверхні похибки, тобто в напрямку, протилежному до напрямку градієнта – в напрямку зменшення, а не збільшення.

Кількість вхідних нейронів відповідає певній кількості ознак, які визначають простору, із якого будуть вибрані всі зразки на вхід ШНМ [8].

Вхідні значення зразків перетворюються під дією вагових коефіцієнтів матриці W_1 та зміщень Θ_1 та Θ_2 у підсумовуючому блоці (СБ) нейронів прихованого шару, а після активації пороговою функцією у блоці активації (БА) нейронів прихованого шару, одержуємо числові значення виходів із нейронів прихованого шару NET_1 та NET_2 . Потім у нейроні вихідного шару під дією вагових коефіцієнтів матриці W_2 та зміщення Θ_3 та активації пороговою функцією у БА вихідного нейрона, одержуємо вихідне числове значення OVT для кожного зразка вхідних сигналів x_1, x_2 .

Структурну схему ШНМ, розглянутої раніше, можна проілюструвати наступним чином: вхідні нейрони нульового шару позначимо $1_0, 2_0$, приховані нейрони першого шару позначимо $1_{(1)}, 2_{(1)}$, а вихідний нейрон – символом $1_{(2)}$, вагові коефіцієнти зміщень для прихованого шару – $\Theta_{1(1)}$ та $\Theta_{2(1)}$, а вихідного

шару – $\Theta_{1(2)}$, вхідні сигнали до 1₀ нейрона через $x_1 = (1,1,0,0)$, а вхідні сигнали до 2₀ нейрона – через $x_2 = (1,0,1,0)$, загальний вихідний сигнал до нульового шару запишемо у вигляді кортежу: $\{(x_1, x_2)\} = \{(1,0;1,0), (1,0;0), (0;1,0), (0;0)\}$, а вихідний сигнал – $OVT = \{0;1;1;0\}$, а вагові коефіцієнти відповідно ω_{ij} та γ_{jk} , матриці яких будуть: $W_1 = \begin{vmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{vmatrix}$ та $W_2 = \begin{vmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{21} \end{vmatrix}$.

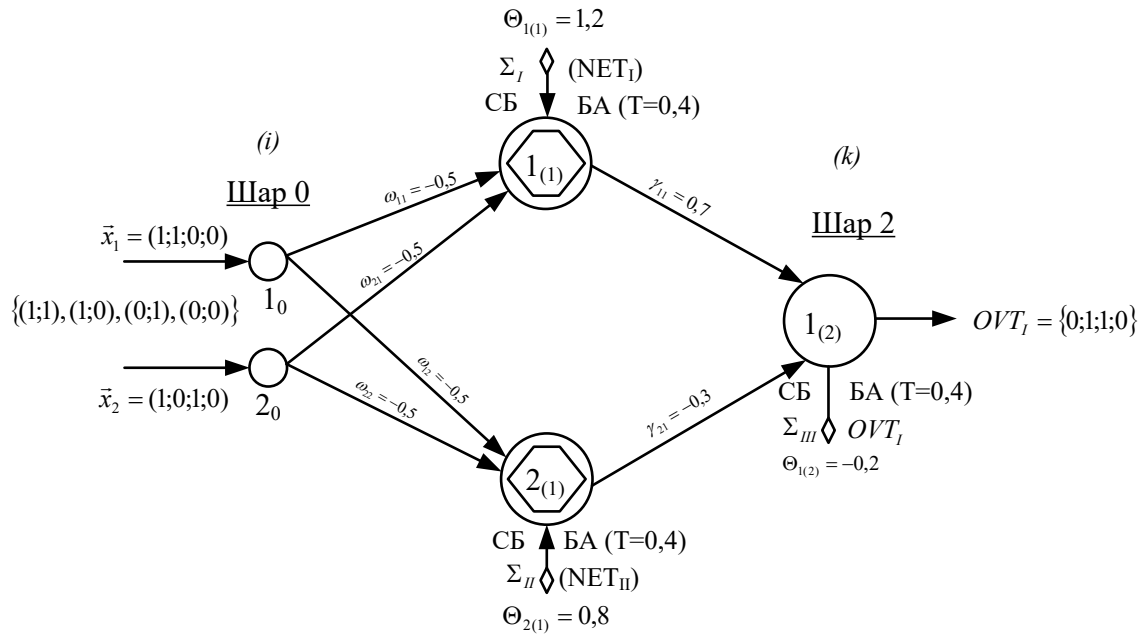


Рисунок 2. Структурну схему штучної нейронної мережі

$$\Sigma_I = \sum_{i=1; j=1}^{i=n; j=m} x_i \omega_{ij} + \Theta_j; i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{m}; \Sigma_{II} = \sum_{i=1; j=1}^{i=n; j=m} x_i \omega_{ij} + \Theta_j; i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{m}; \Sigma_{III} = \sum_{k=1; j=1}^{k=s; j=m} Y_j \gamma_{kj} + \Theta_k; k = 1, \bar{s}; j = 1, \bar{m}.$$

У розглянутому випадку $n=2$, $m=2$, $s=1$, де n – кількість нейронів нульового шару, m – кількість входів до нейронів прихованого шару від нейронів нульового шару (нейронів (першого) прихованого шару), s – кількість нейронів вихідного шару (другого шару); ω_{ij} – ваговий коефіцієнт від i -го шару (вхідного) до j -го нейрона прихованого шару. Тоді ω_{12} – ваговий коефіцієнт зв'язку від першого нейтрона нульового шару (вхідного) до другого нейтрона прихованого шару (першого шару), аналогічно для інших вагових коефіцієнтів. γ_{jk} – ваговий коефіцієнт зв'язку від j -го нейтрона прихованого шару (першого шару) до k -го нейрона вихідного шару (другого шару).

Σ_I – сума вагових зв'язків, які входять до першого нейрона прихованого шару, Σ_{II} – сума вагових зв'язків, які входять до другого нейтрона прихованого шару, Σ_{III} – сума вагових зв'язків, які входять до нейрона виходу (другого шару). $NET_I = Y_1$ – сигнал виходу із першого нейрона прихованого шару, після активації пороговою функцією ($T=0,4$ – числове значення порогу), NET_{II} – сигнал виходу із другого нейтрона прихованого шару (шар 2), OVT – числове значення вихідного сигналу із першого нейрона вихідного шару (другого шару), після активації пороговою функцією ($T=0,4$ – числове значення порогу функції активації). $\{(1,0;1,0), (1,0;0), (0;1,0), (0;0)\}$ – кортеж вхідних сигналів до нульового шару (вхідного шару), $\{1,1,0,0\}$ – кортеж вихідних сигналів із другого шару (вихідного шару).

$\Theta_{1(1)}$, $\Theta_{2(1)}$, $\Theta_{1(2)}$ – вагові коефіцієнти зміщень першого та другого нейронів прихованого шару (першого шару) та першого нейрона вихідного шару (другого шару). $\bar{x}_1 = (1,0;1,0;0;0)$ – вектор вхідних значень до першого нейрона (1₀) вхідного шару (нульового шару), $\bar{x}_2 = (1,0;0;1,0;0)$ – вектор вхідних значень до другого нейрона (2₀) вхідного шару (нульового шару).

Схематично зображена ШНМ на рис 2 для різних вхідних векторів буде одержувати на виході відповідні кожному з них значення [9]:

- 1) (1,0;1,0) на вході, а на виході OVT=0;
- 2) На вході (1,0;0), а на виході OVT=1;
- 3) На вході (0;1,0), а на виході OVT=1;
- 4) На вході (0;0), а на виході OVT=0.

Отже, кожному вхідному вектору (x_1, x_2) на виході ШНМ відповідає певне числове значення OVT.

Порогова функція

$$F(NE\!T) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } NE\!T < T \\ 1, & \text{якщо } NE\!T \geq T \end{cases} \quad (14)$$

є прикладом нелінійної функції активації.

Прикладом лінійної функції є

$$F(NE\!T) = \beta(NE\!T), \quad (15)$$

область значень якої $F(NE\!T) \in (-\infty; +\infty)$, при наявності якої у БА, вихід із нейрона буде рівним значенню входу у цей нейрон, якщо $\beta = 1$. Тоді можна зробити висновок, що багатошарова нейронна мережа із лінійною функцією активації може розв'язувати лише ті задачі, які можуть розв'язувати одношарові нейронні мережі, які мають лише вхідні і вихідні нейрони. Тоді можна зробити наступний висновок, що для багатошарових НМ треба використовувати нелінійні функції активації, це логістична функція

$$F(NE\!T) = 1 + \exp[-\alpha \cdot NE\!T^{-1}], \quad (16)$$

або інші нелінійні функції. Найкращим варіантом є логістична, оскільки вона є неперервною на всій області визначення $(-\infty; +\infty)$, диференційованою і монотонно зростаючою для всіх NE\!T від $(-\infty; +\infty)$ (на інтервалі значень (0;1)).

Отже, кожний елемент і множини вхідних значень x з'єднаний ваговим значенням $x_i \omega_{ij}$ із кожним ШН, а в СБ нейрона знаходять вагову суму входів до даного нейрона, яка поступає на БА, після активації в якому, на вихід до вихідного слою вийде сигнал NE\!T. Вихідний вектор \vec{L} НМ, компонентами якого є виходи OVT із нейронів вихідного шару, чисельно рівний добутку матриці \vec{X} – вектор-рядок вхідних сигналів на матрицю W – матриця вагових коефіцієнтів, тобто [10]:

$$L = XW, \quad (17)$$

де \vec{L} – матриця-рядок.

Багатошарові НМ мають значно більше можливостей при розв'язуванні практичних і прикладних задач, вони являють собою набір шарів, таких що вихід з одного шару буде входом до наступного шару, а збільшення обчислюваних можливостей (потужностей) у порівнянні із одношаровою НМ, можливе лише при наявності нелінійної функції активації між шарами.

Якщо в багатошарових НМ відсутня нелінійна функція активації, то обчислення числового значення вихідного шару знаходять як добуток вихідного вектора X на першу вагову матрицю W_1 , потім на наступну вагову матрицю W_2 . Тобто

$$OVT = (\hat{X}W_1)W_2, \quad (18)$$

а в результаті того, що добуток матриць асоціативний, тоді

$$OVT = (XW_1)W_2 = X(W_1W_2). \quad (19)$$

Тобто по суті здійснений перехід від багатошарової НМ до одношарової НМ, тобто двошарова НМ еквівалентна одному прихованому шару з ваговою матрицею, рівною добутку двох вагових матриць ($W_{заг} = W_1W_2$).

Тоді

$$OVT = (XW_1)W_2 = X(W_1W_2) = X(W_{заг}). \quad (20)$$

Отже, будь-яка багатошарова НМ із лінійною функцією активації може бути замінена на еквівалентну одношарову НМ із ваговою матрицею:

$$W_{заг} = W_1W_2. \quad (21)$$

НМ, які розглядалися раніше, називають прямого поширення вхідного сигналу або мережі з прямими зв'язками, тобто від вхідного шару до шару виходу сигналу із Н, тобто від попереднього шару до наступного і по порядку. Але можливості таких НМ обмежені, у них відсутня пам'ять, тобто їх вихід повністю визначається значеннями вхідних векторів і значеннями вагових коефіцієнтів. Такі мережі ще називають НМ без зворотніх зв'язків.

НМ, які мають зв'язки від вихідних шарів до вхідних, називають мережами з обмеженим зв'язком. У деяких НМ із обмеженими зв'язками значення виходу із мережі повертається на вхідні шари, тобто вихід буде як вхід. Тому НМ із оберненими зв'язками мають властивість, схожу на короткотермінову людську пам'ять.

Алгоритм зворотного поширення сигналу у НМ складається із напрямків поширення сигналу [10]:

- 1) прямий напрямок поширення сигналу від нульового шару до вихідного шару;
- 2) зворотний напрямок поширення сигналу від вихідного шару до вхідного, передаючи значення похибки від вихідного шару до вхідного (першого) шару, що і визначає на яку величину потрібно корегувати вагові коефіцієнти у процесі навчання ШНМ, яке застосовується для того, щоб ШНМ змогла виконувати поставлену перед нею задачу по даних, які до неї надходять.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

З метою вирішення завдання прогнозування електроенергоспоживання підприємствами авіаційної галузі України обхідно вирішити багатокритеріальну задачу, що ускладнюється великою кількістю факторів, що впливають та визначення прогнозованого рівня енергоспоживання.

Необхідність прогнозування рівня електроенергоспоживання підприємствами авіаційної галузі обумовлено сучасними особливостями закупівлі електричної енергії.

Застосування нейронних мереж для прогнозування рівня електроспоживання в енергетичних системах підприємств авіаційної галузі дозволить знизити відсоток похибки при впровадженні до системи електропостачання цих підприємств джерел розосередженої генерації.

Література

1. Бабак В. П., Харченко В. П., Максимов В. О. та ін. Безпека авіації К., 2004. 584 с.
2. Синчук О. Н., Бойко С. М. Нейронні мережі та управління процесом управління електропостачанням об'єктів від комбінованих електричних мереж // технічний електродинаміка. - 2014. - № 5. - С. 53-55.
3. Клепиков В. Б. Застосування методів нейронних мереж і генетичних алгоритмів у вирішенні завдань управління електроприводами / В. Б. Клепиков, К. В. Махота, С. А. Сергеев // Електротехніка. - 1999. - № 5. - С. 2-6.
4. Руденко О. Г. Основи теорії штучних нейронних мереж / О. Г. Руденко, Є. В. Бодянский. - Харків: ТЕЛТЕХ, 2002. - 317 с.
5. Ліла В. Б. Алгоритм і програмна реалізація адаптивного методу навчання штучних нейронних мереж / В. Б. Ліла // Інженерний вісник Дона. - 2012. - Т. 19. - № 1. - С. 55-59.
6. Denisov Y. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit / Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE, 2016. - P. 327-332.
7. Gorodny O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / Gorodny O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017. - P. 232-235.
8. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer 2014. 396 p.
9. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startceva T.B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods // RNSPE, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan: Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. P. 440-442.
10. Bayir R. Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors [Text] / R. Bayir, O. F. Bay: IJSIT Lecture Note of International Conference on Intelligent Knowledge Systems, Vol. 1, № 1, 2004.

References

1. Babak V. P., Xarchenko V. P., Maksymov V. O. ta in. Bezpeka aviacyi K., 2004. 584 s.
2. Synchuk O. N., Bojko S. M. Nejronni merezhi ta upravlinnya procesom upravlinnya elektroposta-channam ob'yektiv vid kombinovanykh elektrychnykh merezh // texnichnyj elektrodinamika. - 2014. - № 5. - S. 53-55.
3. Klepikov V. B. Zastosuvannya metodiv nejronnykh merezh i henetychnykh alhorytmiv u vyrishenni zavdan" upravlinnya elektropryvodamy / V. B. Klepikov, K. V. Maxota, S. A. Serhyeyev // Elektrotexnika. - 1999. - № 5. - S. 2-6.
4. Rudenko O. H. Osnovy teoriiy shchuchnykh nejronnykh merezh / O. H. Rudenko, Ye. V. Bodyans"kyj. - Xarkiv: TELETEX, 2002. - 317 s.
5. Lila V. B. Alhorytm i prohramna realizaciya adaptivnoho metodu navchannya shchuchnykh nejronnykh merezh / V. B. Lila // Inzhenernyj visnyk Dona. - 2012. - T. 19. - № 1. - S. 55-59.
6. Denisov Y. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit / Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE, 2016. - P. 327-332.
7. Gorodny O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / Gorodny O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017. - P. 232-235.
8. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer 2014. 396 r.
9. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startceva T.B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods // RNSPE, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan: Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. P. 440-442.
10. Bayir R. Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter mo-tors [Text] / R. Bayir, O. F. Bay: IJSIT Lecture Note of International Conference on Intelligent Knowledge Sys-tems, Vol. 1, № 1, 2004.

ЗАХАРКЕВИЧ О. В.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6542-9727>e-mail: zakharkevych@khmnu.edu.ua**КУЛЕШОВА С. Г.**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2361-2950>e-mail: kuleshovs@khmnu.edu.ua**ТКАЧУК С. В.**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2283-9101>e-mail: denver8403@gmail.com**ЛУК'ЯНЧУК С. В.**

Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОДЯГУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В роботі наведено результати досліджень перспектив застосування полімерних матеріалів для виготовлення одягу спеціального призначення робітників атомних електростанцій для захисту від радіоактивного забруднення з представленням проєктованих методів обробки вузлів куртки чоловічої.

Ключові слова: спеціальний одяг для працівників атомних електростанцій, герметизуючі шви, полімерні матеріали.

Oksana ZAKHARKEVICH, Svitlana KULESHOVA, Serhii TKACHUK, Svitlana LUKYANCHUK
Khmelnitskyi National University

ANALYSIS OF PROSPECTS OF APPLICATION OF POLYMERIC MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF NUCLEAR PROTECTIVE CLOTHING

The article is devoted to identifying the main ways to improve the design and manufacture of clothing for nuclear power plant workers to ensure the competitiveness of domestic products. The scientific novelty of the work is that it further developed the issue of systematization of the range of nuclear protective clothing, which identified ways to improve its design processes in the domestic garment industry. The practical significance of the work lies in the use of polymeric materials in the designed methods of processing the components of the developed suit of nuclear protective clothing. The authors analyze the current state of research in the design and manufacture of nuclear protective clothing. Depending on the work performed, the range of nuclear protective clothing is considered from the standpoint of the materials used. The world leaders producing nuclear protective clothing are 3M; Lakeland; DuPont; Honeywell; Microgard; Delta Plus; Kappler; Casco; MATISEC; VersarPPS. According to the results of the analysis of the range of nuclear protective clothing, it is determined that the vast majority of manufacturers focus on the materials from which nuclear protective clothing is made to protect against radiation pollution and other harmful factors. As a result of scientific research, the basic approaches of the world leaders-manufacturers of nuclear protective clothing concerning the connection of details of products are defined. A database of seams used to make nuclear protective clothing has been formed. Among the variety of protective clothing, the basic design and technological solutions of protective clothing are identified as those that most fully protect against certain types of hazards for various industries in terms of passive methods of employee protection. The selected range of basic protective clothing includes suits and varieties of pants and jackets. A men's jacket as a part of nuclear protective clothing is proposed, and methods of processing the product's main components based on the use of polymeric materials are improved. Sealing the joints of the product parts using a film with a polymer coating is suggested. The authors have formulated requirements for materials used for the manufacture of suits for nuclear power plant workers: indicators of physical and mechanical, and physicochemical properties of materials for manufacturing white suits.

Keywords: nuclear protective clothing, sealing the seams, polymeric materials.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Бурхливий розвиток ядерної енергетики, накопичення великих запасів радіоактивних речовин та використання бойових отруйних речовин обумовлює актуальність теми створення сучасних видів засобів індивідуального захисту людини в умовах радіоактивного забруднення.

Науковці провідних організацій упродовж тривалого часу займалися дослідження медичних аспектів дії радіоактивного випромінювання, створенням методів і обладнання для вивчення властивостей, розробкою нових видів радіаційно-захисного одягу. Роботи Голінько В.І. [1], Третьякової Л.Д. [2, 3], Курганського А.В. [4], Колосніченко М.В. [11, 16, 21], Кожушко Р.Ю. [12], Остапенко Н.В. [15, 16, 21], Крючкової С.А. [22] та ін. присвячено вивченню наслідків радіаційного випромінювання, розробці лабораторної бази і створенню матеріалів і нових видів одягу для захисту від радіоактивного забруднення.

Створення безпечних умов праці та реалізація в Україні кращих європейських і світових практик промислової безпеки, гігієни праці та виробничого середовища неможливе без проєктування, виготовлення і впровадження якісно нових різновидів засобів індивідуального захисту працівників. Не маючи глибинного наукового обґрунтування, визначених методів і критеріїв оцінки параметрів захисного одягу, важко розширити номенклатуру виробів, потреба в яких безперервно зростає.

Аналіз останніх джерел

Атомна енергетика на сьогодні є найбільш економічним і екологічно чистим способом виробництва електроенергії і промислового тепла за умови забезпечення ядерної, радіаційної і технічної безпеки атомних електростанцій (АЕС) [4]. Основними чинниками радіаційної дії на персонал АЕС є потоки зовнішнього іонізуючого випромінювання (ІВ) від вказаних джерел. Основне дозове навантаження на персонал відбувається під час зупинки блоків, коли проводяться планові і профілактичні роботи (ППР) та під час ліквідації наслідків аварій на АЕС, коли виникає проблема захисту персоналу від дії джерел іонізуючого випромінювання, поблизу яких проводяться роботи.

Актуальність теми обумовлена незадовільним рівнем захисту працівників АЕС існуючими видами спеціального захисного одягу для профілактичних робіт при ІВ. В зв'язку з цим, актуальним є питання створення даного виду одягу з вітчизняних матеріалів та на українських підприємствах.

Технічне регулювання якості виробів захисного одягу забезпечується національним законодавством та міжнародними актами, ратифікованими Україною та передбаченими Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, застосуванням низки нормативних документів, серед яких визначальну роль відіграють національні стандарти, більшість яких на часі гармонізовано з європейськими та міжнародними відповідно до національного законодавства та міжнародних актів [5, 6, 7]. Наразі актуальність визначеного напрямку досліджень з проблеми розробки ефективного захисного одягу різної функціональної спрямованості видається беззаперечною і підтвердженням того є статистичні дані про рівень виробничого травматизму і смертності працівників [8, 9, 10].

Велике значення на розвиток науки в галузі розробки ефективного захисного одягу і матеріалів для них мають наукові здобутки таких фахівців, як Романов В.С., Чубарова З.С., Русинова А.М., Колесніков П.А., Мичко А.А., Третьякова Л.Д. [2, 3], Колосніченко М.В. [11], Tappura K., Holdstock P. та інші. Проте багатофакторність і міждисциплінарність розвитку наукових основ проєктування захисного одягу, стійка тенденція до появи на світовому ринку нових текстильних захисних матеріалів, сучасні технології виготовлення одягу виключають одномоментність рішень та вичерпність теми.

До параметрів засобів індивідуального захисту висувають велику кількість показників, які важко досягнути в повному обсязі: сфера застосування; захисні властивості; асортиментний ряд; показники якості, надійності, економічності, комфортності, ергономічності [2, 3]. Показники якості ЗІЗ загального призначення регламентуються великою кількістю нормативних документів, спеціальних стандартів та внутрішніх документів. Наприклад, відповідно до діючих стандартів встановлено 26 показників якості для виробничого захисного одягу (ЗО), 28 – для захисного взуття, 18 – для герметичного одягу, 16 – для респіраторів і 20 – для дихальних апаратів [9, 10].

Автором [3] висвітлено проблеми створення сучасних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) працівників АЕС. Розроблено рецептури полімерних матеріалів з прогнозованими властивостями, призначені для створення засобів індивідуального захисту визначеної функціональної спрямованості. Встановлено закономірності впливу характеристик якості нових полімерних матеріалів на показники захисту, надійності та безпеки використання захисного одягу за умов виробничого середовища АЕС. Наведено математичну модель і метод структурної оптимізації для обґрунтування способів підвищення ефективності захисних комплектів. Увагу приділено розробці конструктивно-технологічних рішень та впровадженню у виробництво ізолювальних, фільтрувальних, радіаційнозахисних комплектів для працівників АЕС.

У дослідженнях [4] проведено аналіз і запропоновано класифікації засобів індивідуального захисту персоналу АЕС і радіаційно-захисних матеріалів. Уточнено перелік і здійснено оцінювання значущості показників якості одягу. Обґрунтовано використання засобів для зменшення впливу ваги спеціального одягу на тіло працівника. Розроблено експериментальну установку для визначення ефективності використання каркасу для зниження навантаження на плечову ділянку від маси одягу. Запропоновано фізичну та математичну моделі процесу впливу ваги одягу для захисту від підвищеного рівня іонізуючого випромінювання на тіло людини.

Автором [12] розроблено номенклатуру показників якості виробів фільтрувального та ізолюючого типів, яка окрім загальних та спеціалізованих показників, що регламентовані ГОСТ 12.4.016-83, включає також додаткові показники. Відповідно до вказаних вимог були підібрані властивості матеріалів, які в результаті проведеного аналізу можуть бути використані для одягу для захисту від радіаційного забруднення фільтрувального та ізолюючого типів.

Над розробкою нових видів ізолювального, радіаційнозахисного та фільтрувального захисного одягу працюють і вчені світу [13, 14]. Наприклад, розробляють переносну охолоджувальну систему, яка призначена підтримувати нормальну температуру людського тіла [13].

Проведений аналіз дозволив визначити, що провідну роль у розробці одягу для захисту від радіоактивного забруднення, який буде відповідає вимогам експлуатації відіграє правильний вибір пакету матеріалів, який базується на об'єктивній та всебічній оцінці його захисних властивостей, а також конструкторсько-технологічні особливості одягу.

Формування цілей статті

Мета роботи – визначення основних шляхів удосконалення процесів проєктування та виготовлення одягу для робітників атомних електростанцій для забезпечення конкурентоспроможності виробів вітчизняного виробництва. Для досягнення мети передбачено виконання наступних завдань:

- проаналізувати сучасний стан досліджень в галузі проектування та виготовлення одягу для захисту від радіоактивного забруднення;
- проаналізувати асортимент спеціального одягу для працівників атомних електростанцій в залежності від виконуваних робіт;
- визначити світових лідерів-виробників спеціального одягу для працівників атомних електростанцій;
- виділити основні шляхи удосконалення процесів проектування та виготовлення спеціального одягу для працівників атомних електростанцій.

Об'єктом дослідження є процес проектування одягу для захисту від радіоактивного забруднення із застосуванням полімерних матеріалів. Предмет дослідження – асортимент одягу робітників атомних електростанцій. Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній набуло подальшого розвитку питання систематизації асортименту спеціального одягу для робітників атомних станцій, що дозволило виділити шляхи удосконалення процесів його проектування в умовах вітчизняних підприємств швейної промисловості.

Практичне значення роботи полягає в застосуванні полімерних матеріалів в проєктованих методах обробки вузлів розробленого костюма спеціального одягу для працівників атомної електростанції.

Виклад основного матеріалу

Станом на 2022 рік у 31 країні світу експлуатується 191 атомна електростанція з 448 енергоблоками (рис. 1). 57 енергоблоків знаходяться на стадії будівництва. 162 енергоблоки закриті, ще 1 не працює, проте рішення про остаточне закриття ще не прийняте. Найбільша АЕС в Європі – Запорізька атомна електростанція в місті Енергодарі (Запорізька область). В Україні розташовані п'ять АЕС. На працюючих українських АЕС встановлено 15 енергоблоків сумарною потужністю 13 888 МВт, які виробляють приблизно 40~50% від загального обсягу електроенергії в Україні.

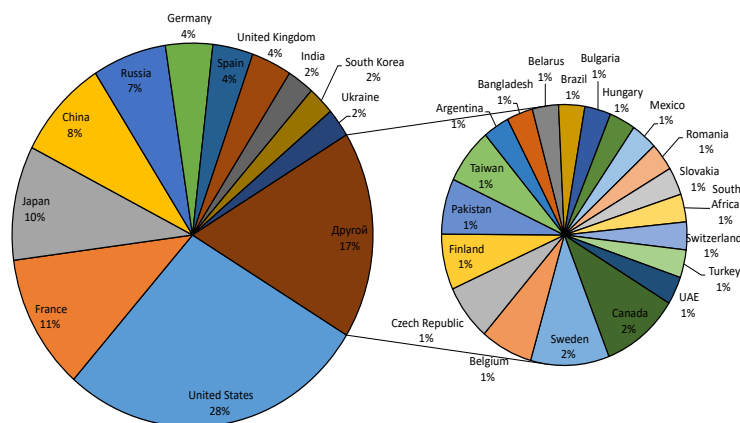


Рис. 1. Розподіл атомних електростанцій по країнах світу

Величезна кількість АЕС у світі спричинює необхідність у відповідному спецодязі. Відповідно велика кількість фірм-виробників спеціального одягу зі світовим ім'ям пропонують свої послуги та продукцію онлайн, а використання цих видів спецодягу легко прослідкувати через офіційні сайти атомних електростанцій світу (таблиця 1).

Перевищення рівня травматизму і кількості професійних захворювань в Україні порівняно з аналогічними показниками у країнах Європейського Союзу і, водночас, перенасиченість ринку виробів захисного одягу, зумовлює потребу аналізу багатфакторної моделі виробничого середовища – комплект захисного одягу – процес і результат діяльності – самопочуття та здоров'я працівника [15].










В результаті аналізу визначено, що виробники захисного одягу розрізняють: за терміном експлуатації, за сезоном, за призначенням, за особливостями додаткового регулювання підодягового мікроклімату (при активному та пасивному способі захисту). Існує також класифікація одягу за асортиментом, а саме виробники для захисту голови, ніг, рук, захисний одяг тощо [11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

Згідно основних стандартів термін «спеціальний одяг» (від лат. *specialis* – особливий, своєрідний) визначається як виробничий одяг для захисту тих, хто працює від впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників [20, 23]. У зв'язку з гармонізацією національних стандартів з регіональними і міжнародними з'явилась термінологія, притаманна закордонним стандартам. Одяг спеціальний – одяг, що використовують на заміну звичайного або одягають зверху нього з метою захисту працівника від одного або декількох видів небезпеки [23]. Стійким словосполученням є спецодяг.

Захисний одяг виготовляють із тканин різного сировинного складу, структури, призначення тощо; натуральних шкір; штучних шкір; трикотажних полотен; хутра; нетканих матеріалів; матеріалів з покриттям (гумовим, полівінілхлоридним, металізованим тощо); матеріалів з просочуванням (вогнестійким, кислотозахисним, іскростійким, комбінованим тощо) тощо [24, 25].

Таблиця 1

Спеціальний одяг працівників АЕС світу

Країна	АЕС	Зображення спеціального одягу робітників АЕС
Іспанія	Almaraz Nuclear Power Plant	
Японія	Sendai	
	KKashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant (найбільша у світі)	
Південна Корея	Kori Nuclear Power Plant	
Канада	Bruce Nuclear Generating Station	
Україна	Запорізька АЕС (найбільша у Європі)	
	Рівненська АЕС	
	Південно-українська АЕС	
	Хмельницька АЕС	

Основне виробництво одягу для захисту від радіоактивного забруднення зосереджене в наступних регіонах світу: Північна Америка, Європа, Китай, Японія, Південно-східна Азія та Індія [26]. Світовими лідерами-виробниками спеціального одягу для працівників атомних електростанцій є наступні: 3M; Lakeland; DuPont; Honeywell; Microgard; Delta Plus (переважно пристрої, аксесуари, різноманітні технічні засоби для захисту від шкідливих факторів середовища тощо); Kappler; Kasco (переважно пристрої, аксесуари, різноманітні технічні засоби для захисту від шкідливих факторів середовища тощо); MATISEC; VersarPPS (таблиця 2).

Таблиця 2

Аналіз асортименту захисного одягу для захисту від радіаційного забруднення

Фірма-виробник	Основний матеріал	Костюм (модель)	Кількість моделей
1	2	3	4
Lakeland http://cdn2.hubspot.net/hubfs/134559/Canada/Site_Pages/Docs/cdn_disp_chem_bg_rev1.pdf	Micromax	Micromax [®] NS	13
		Micromax [®] NS Cool Suit	2
	SafeGard	SafeGard [®]	8
	ZoneGard	ZoneGard [®]	3
	Pyrolon	Pyrolon [®] Plus 2	1
		Pyrolon [®] CRFR	6
		ChernMax [®] 1	7
		ChernMax [®] 2	8
Microgard http://microgard.com/adminimages/microgard_brochure_English.pdf	ChernMax	ChernMax [®] 3	8
		ChernMax [®] 4	5
		Interceptor [®]	4
		Microgard [®] 1500	1
	Microgard	Microgard [®] 1500 PLUS	1
		Microgard [®] 2000	25
		Microgard [®] 2500	11
		Microgard [®] FR	1
		Microgard [®] CFR	1
	Microchem	Microchem [®] 3000	13
		Microchem [®] 4000	15
		Microchem [®] 5000	6
1	2	3	4
Kappler https://www.kappler.com/	PROVENT	PROVENT	12
		PROVENT BC	4
		PROVENT PLUS	10
	LANTEX	LANTEX 100	1

	ZYTRON	ZYTRON 100XP	8
		ZYTRON 200	15
		ZYTRON 300	17
		ZYTRON 400	9
		ZYTRON 5000	14
	DURACHEM	DURACHEM 200	13
		DURACHEM 500	1
	FRONTLINE	FRONTLINE 300	4
		FRONTLINE 500	3
Honeywell https://www.honeywellsafety.com/Europe/Product_Catalog/Protective_Clothing.aspx?tid=1151&bid=0&hid=0&iid=267&uid=637112371079137894	Hapichem	Hapichem	1
	Type 3	Type 3 – liquid-tight protection (jet)	1
	FR	FR-Flame-retardant protection	1
	Emmanuelle	Emmanuelle	1
	Deltasafe	Deltasafe – Flame retardant (FR) M1 polypropylene coveralls	1
	Mururoa	Mururoa	1
	Gridel	Gridel	1
	MAR 95-3	MAR 95-3	1
MATISEC https://www.matisec.com/products-services/nuclear-protection/ventilated-suits	MATIVENT HOOD	MATIVENT HOOD	1
	MRV5 PROTECTIVE SUIT	MRV5 PROTECTIVE SUIT	1
	PK17 PROTECTIVE SUIT	PK17 PROTECTIVE SUIT	1
	TIVA PROTECTIVE SUIT	TIVA PROTECTIVE SUIT	1
DuPont http://www.dupont.co.uk/products-and-services/personal-protective-equipment/chemical-protective-garments-accessories/uses-and-applications/nuclear-protective-clothing.html	Tychem®	Tychem®C&C2	1
		Tychem®C	1
		Tychem®F&F2	1
		Tychem®F	1
		Tychem® 2000 C Standard	1
		Tychem® 6000 F Standard	1
DuPont http://www.dupont.co.uk/products-and-services/personal-protective-equipment/chemical-protective-garments-accessories/uses-and-applications/nuclear-protective-clothing.html	Tyvek®	Tyvek® 600 Plus	1
		Tyvek® 500 Xpert	1
		Tyvek® Industry	1
		Tyvek® Classic Xpert	1
		Tyvek® Classic PLUS	1
		Tyvek® Labo	1
		Tyvek® Dual	1
		ProShield® 10	1
	Tyvek®+SMS	ProShield® 30	1
		ProShield® FR	1
	SMS		1

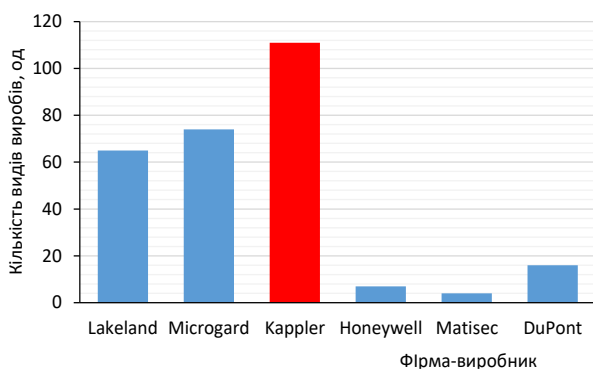


Рис. 2. Визначення світових лідерів-виробників спеціального одягу для захисту від радіаційного забруднення

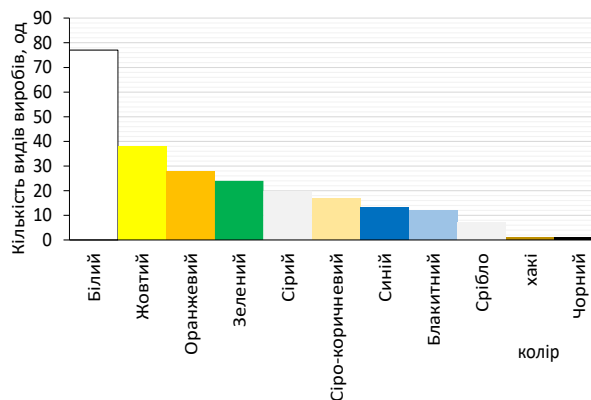


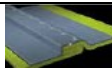





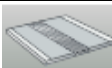
Рис. 3. Кольори матеріалів, що застосовуються для виготовлення спеціального одягу для захисту від радіаційного забруднення

З'єднання деталей виробів для захисту голови, рук, ніг залежно від їх захисних властивостей і матеріалів, що застосовуються, виконують нитковим, зварним, клейовим, комбінованим способами [18, 22, 23, 27, 29]. Крім того, одяг для захисту від радіаційного забруднення часто розробляють одноразовим [26].

Таблиця 3

Аналіз швів, що використовують для виготовлення спеціального одягу світові лідери-виробники

З'єднання	Шов	Зображення шва	Фірма-виробник
Ниткове	Serged / Stitched / Красобметувальна строчка		Lakeland Kappler Microgard DuPont
	Bound / Обкантований		Lakeland Kappler Microgard

Ниткове + клейове	Heat Sealed / Taped / Stitched & Taped / Проклеєний		Lakeland
			Kappler
			Microgard
Ниткове + клейове	Heat Sealed Plus / Проклеєний з двох боків		Lakeland
Ультразвукове	Ultrasonic / Ultrasonically Welded / Ультразвукове зварювання		Kappler
			Microgard
	Ultrasonically Welded & Taped / Ультразвукове зварювання і проклеєний		Microgard

Таким чином, в результаті досліджень, для виготовлення одягу спеціального призначення робітників атомних електростанцій для захисту від радіоактивного забруднення обрано костюми, складовими яких є різновиди штанів і курток. Костюм виробничий – виробничий одяг, який складається з куртки (блузи) і штанів (напівкомбінезону) для захисту тулуба, рук і ніг від різних виробничих факторів. Костюм виробничий може бути в комплекті з жилетом, головним убором, фартухом [23].

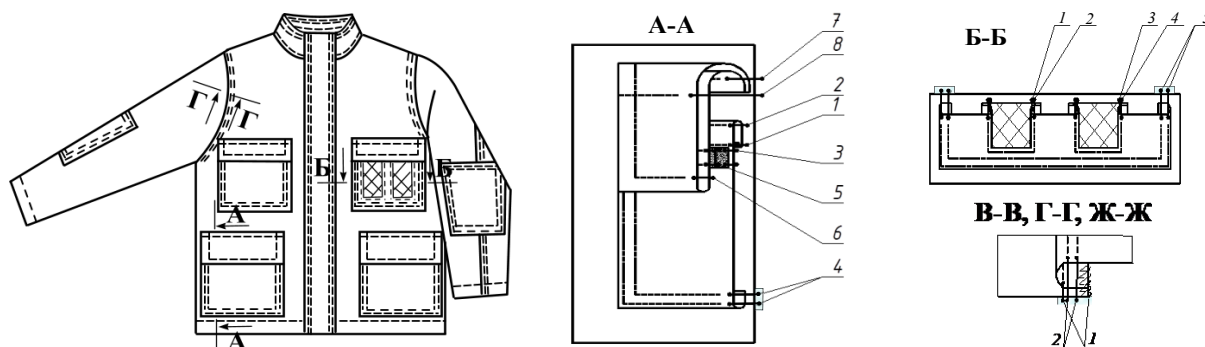
Запропоновано модель-пропозицію чоловічої куртки. З урахуванням даних таблиці 3, місця з'єднання деталей таких виробів рекомендовано герметизувати [2, 3, 26-29].

Куртка прямого силуету, для чоловіків, довжиною до лінії стегон, з застібною на тасьму-блискавку та вітрозахисну планку із застібною на тасьму текстильну. У верхній частині лівої пілочки-накладна кишеня з подвійним віконцем із термоплівки (18x15 см) з клапаном на двох текстильних застібках. У верхній частині правої пілочки – накладна кишеня з клапаном на двох текстильних застібках. Нижня частина пілочки з двома накладними кишенями з клапанами на текстильній застібці. Спинка суцільновикроєна. Комір-стояк шириною 8 см. Рукава вшивні, прямі з ліктьовим швом з підсилювальними накладками на ліктях. Низ рукава оброблено швом упідгин.

Оздоблювальні строчки прокладені по відльоту коміра-стояка, швах настрочування кишень, настрочування вітрозахисної планки, швах настрочування підсилювальних накладок прокладені подвійні оздоблювальні строчки на відстані 0,2 см і 0,7 см. Закріпки для посилення швів в наступних місцях: 12 на кишенях накладних куртки і штанів, 12 на клапанах куртки і штанів, 2 по вітрозахисній планці.

Термостійка прозора плівка, застібка-блискавка, текстильна застібка виготовлені із матеріалів, які витримують температуру до 100°C при сушінні та пранні, витримують механічне навантаження при пранні в пральних машинах барабанного типу та при прасуванні на прасувальних пресах.

На основі аналізу результатів попередніх досліджень (табл. 2, 3, рис. 2, 3) визначено вимоги до матеріалів, що застосовуються: Показники фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей матеріалів, для виготовлення костюмів білого кольору: тканина – саржевого переплетіння, відбілена; склад – 100% бавовна; мінімальна густина тканини – 240 г/м²; стійкість тканини до розривних навантажень (основа/уток), Н, не менше – 1000/600; зміна лінійних розмірів після прання (основа/уток), %, не більше, не більше 1,5/1,5; стійкість до стирання по ГОСТ 18976-73, циклів, не менше – 2900, стійкість забарвлення до прання по ГОСТ 9733.4-83, бали, не менше 4, стійкість забарвлення до сухого тертя по ГОСТ 9733.27-83, бали, не менше 4. З'єднання зрізів деталей костюму виконують зшивним, обшивним, настрочним і накладним швами. Місця з'єднання деталей виробу запропоновано герметизувати використовуючи плівку з полімерним покриттям (рис. 4) [3, 29, 30].



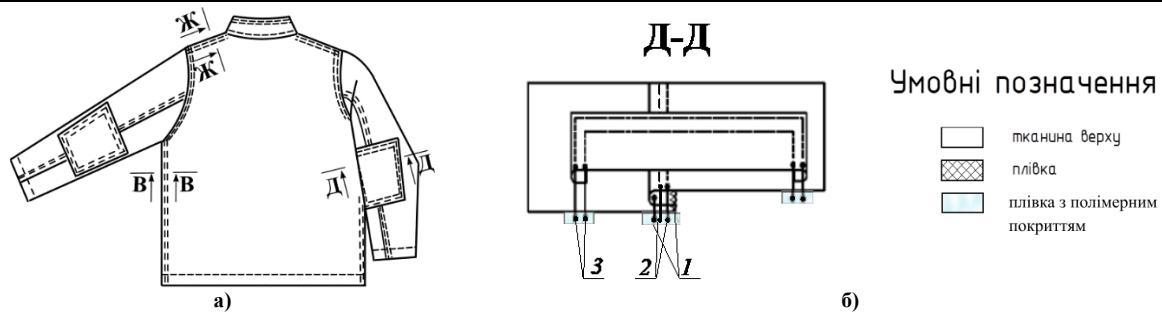


Рис. 4. Проектовані методи обробки вузлів куртки:
а) – вигляд виробу спереду і ззаду; б) – основні вузли виробу

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проаналізовано сучасний стан досліджень в галузі проектування і виготовлення одягу для захисту від радіоактивного забруднення. Асортимент спеціального одягу для працівників атомних електростанцій в залежності від виконуваних робіт розглянуто з позицій використаних матеріалів. Визначені світові лідери-виробники спеціального одягу для працівників атомних електростанцій, а саме: 3M; Lakeland; DuPont; Honeywell; Microgard; Delta Plus; Kappler; Kasco; MATISEC; VersarPPS. Згідно з результатами аналізу асортименту спеціального одягу визначено, що переважна більшість виробників концентрують свою увагу на матеріалах, з яких виготовляють спеціальний одяг для захисту як від радіаційного забруднення, так і від інших шкідливих факторів.

В результаті проведення наукових досліджень визначено основні підходи світових лідерів-виробників спеціального одягу щодо з'єднання деталей виробів. Сформовано базу даних швів, що використовують для виготовлення спеціального одягу.

Серед розмаїття захисного одягу виділені базові конструктивно-технологічні рішення виробів захисного одягу, як такі, що найбільш повно забезпечують захист від визначених видів небезпек для різних галузей виробництва за умов пасивного способу захисту працівника. До обраного асортименту основного захисного одягу належать костюми, складовими яких є різновиди штанів і курток.

Запропоновано модель-пропозицію чоловічої куртки і удосконалено методи обробки основних вузлів на основі застосування полімерних матеріалів. Місця з'єднання деталей виробу запропоновано герметизувати використовуючи плівку з полімерним покриттям.

Сформовано вимоги до матеріалів, що застосовуються для виготовлення костюма для робітників атомної електростанції: показники фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей матеріалів, для виготовлення костюмів білих. Результати розрахунків вказують на те, що проектовані методи обробки вузлів куртки чоловічої забезпечують більшу економічну ефективність виробництву за рахунок високої якості продукції при мінімальних витратах часу на виготовлення вказаного виробу. Згідно з проведеними дослідженнями інновацій у галузі розробки спеціального одягу для робітників атомної електростанції доцільно зосередитися на удосконаленні та розробці нових матеріалів для розширення асортименту та якості продукції, а також впровадженні смарт-технологій для поліпшення комунікації між замовниками-користувачами кінцевої продукції та виробниками.

Література

1. Голінько В.І. Проектування засобів індивідуального захисту працюючих : навч. посіб. / В.І. Голінько, Л.Д. Третякова, С.І. Чеберячко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 181 с.
2. Третякова Л. Д. Новітні рішення проблеми індивідуального захисту працівників атомних електричних станцій: Монографія / Л. Д. Третякова. – К.: Основа, 2016. – 216 с.
3. Tretiakova L. Designing of rational structure of range of insulating protective clothing on the basis of the principles of transformation / L. Tretiakova, N. Ostapenko, M. Kolosnichenko, K. Pashkevich, T. Avramenko // *Vlakna a textil (Fibres and Textiles)*. – 2016. – Volume 23(4). – P. 27–35. – Режим доступу : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42495/1/Designing_of_Rational_Structure.pdf
4. Курганський А. В. Розробка спеціального одягу для захисту від підвищеного рівня іонізуючого випромінювання : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.19 / Курганський Андрій Володимирович ; Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – К., 2011. – 21 с.
5. Законодавство України. [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів від 27 серпня 2008 р. N 761 про затвердження Технічного регламенту засобів індивідуального захисту відповідно до статті 14 Закону України «Про стандарти, технічні регламенти та процедури оцінки відповідності» (3164–15). Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/761-2008-%D0%BF>.
6. Засоби індивідуального захисту (IMAS 10.30:2013, IDT): ДСТУ-П IMAS 10.30:2016. – [Чинний від 2016-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2016. – 14 с. – (Національний стандарт України).
7. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Основні положення : ДСТУ 3900.101:2014. – [Чинний від 2014-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 14 с. – (Національний стандарт України).
8. Праця України у 2013 році [Електронний ресурс] : Статистичний збірник. Державна служба статистики України, 2014. – Режим доступу : https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/publ11_u.htm.

9. Безпечність промислових підприємств. Терміни та визначення [Електронний ресурс] : ДСТУ 2156-93. – [Чинний від 1995-01-01] – Режим доступу : http://document.ua/bezpechnist-promislovih-pidприємств_-termini-ta-viznachennja-nor3429.html.
10. Івчук Ю. Ю. «Безпека праці (безпечні і здорові умови праці)» як компонента «гідної праці» в трудовому праві / Ю. Ю. Івчук // Право та інновації. – 2015. – № 4. – С. 129–137.
11. Колосніченко М.В. Розвиток наукових основ створення термозахисного спеціального одягу : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.04 / Колосніченко Марина Вікторівна ; Київський національний ун-т технологій та дизайну. – К., 2004. – 376 с.
12. Кожушко Р. Ю. Розробка одягу для захисту від радіоактивного забруднення : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.18.19 / Кожушко Роман Юрійович ; Київський національний ун-т технологій та дизайну. – К., 2009. – 20 с.
13. Delkumburewatte G. B. Wearable cooling system to manage heat in protective clothing / G. B. Delkumburewatte, T. Dias. // The Journal of the Textile Institute. – 2012. – Vol. 103. – P. 483–489.
14. McLellan T. M. Protective clothing ensembles and physical employment standards / T. M. McLellan, G. Havenith. // Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. – 2016. – Vol. 41. – P. 121–130.
15. Остапенко Н. В. Розвиток наукових основ дизайн-проектування захисного одягу з використанням принципів трансформації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.18.19 "технологія текстильних матеріалів, шве-йних і трикотажних виробів" / Остапенко Наталія Валентинівна – Київ, 2017. – 44 с.
16. Дизайн-проектування виробів спеціального призначення : навч. посіб. / Н.В. Остапенко, М.В. Колосніченко, Т.В. Лупкер та ін. – К. : КНУТД, 2016. – 320 с.
17. Tranemo advanced workwear 2017 [Electronic resource]. – Mode of access : https://issuu.com/monelw/docs/tranemo_cat33_uk?e=11284842/42652323.
18. Каталог фірми BRISTOL Uniforms [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.bristoluniforms.com>.
19. Каталог фірми flamepro [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.flamepro.com>.
20. Каталог фірми Dräger [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.dräger.com.heimanfireequipment.com>.
21. Остапенко Н.В. Проектування спеціального одягу / Н.В. Остапенко, О.В. Колосніченко // Енциклопедія швейного виробництва : навч. посіб. – К. : «Самміт-книга», 2010. – 968 с.
22. Крючкова С.А. Дослідження конструктивно-технологічних рішень захисного одягу для працівників АЕС / С.А. Крючкова, Н.В. Остапенко, Л.Д. Третякова : тези доповідей XII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів [«Наукові розробки молоді на сучасному етапі»], (25–26 квітня 2013р.) / М-во освіти і науки України, КНУТД. – К. : КНУТД, 2013. – Т.1. – С. 67.
23. Одяг спеціальний захисний. Загальні вимоги (EN 340:1993, IDT) : ДСТУ EN 340-2001. – [Чинний від 2003-07-01]. – К. : Держпоживстандарт України, 2003. – 12 с. – (Національний стандарт України).
24. Галик І. С. Текстильні матеріали та вироби : тлумачний словник / І. С. Галик, Б. Д. Семак. – Львів : Видавництво Львівської комерційної академії, 2010. – 224 с.
25. Галик І. С. Шляхи підвищення конкурентоспроможності вітчизняного текстилю на ринках / І. С. Галик, Б. Д. Семак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 97-102.
26. Nuclear Protective Clothing Market Rising Trends, Demand and Sales 2019 to 2025 [Electronic resource] // The Ukiah Post. – 2019. – Available at: <https://www.ukiahpost.com/nuclear-protective-clothing-market-rising-trends-demand-and-sales-2019-to-2025/>.
27. Technical aspects of dissolvable protective clothing / [M. E. Cournoyer, D. L. Wannigman, S. Lee et al.]. // Journal of Chemical Health and Safety. – 2012. – Vol.19. – P. 2–11.
28. Struminska T. Designing of special clothing based on experimental researches of material properties / T. Struminska, S. Prasol, E. Kolosnichenko, N. Chuprina and N. Ostapenko // Vlakna a textil (Fibres and Textiles). – 2019. – Volume 4. – P. 84–95. – Режим доступу : http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT_2019_4_10.pdf
29. Шаран Т. Г. Удосконалення виготовлення спецодягу з підвищеними захисними властивостями для робітників металообробних цехів: дис. ... канд. тех. наук : 05.18.19 / Шаран Тетяна Григорівна. – Хмельницький, 2012. – 153 с.
30. Horiashchenko S. Mechanical properties of polymer coatings applied to fabric / S Horiashchenko, J Musiał, K Horiashchenko, R Polasik, T Kałaczyński // Polymers. – 2020. – Volume 12 (11). – 2684. – Режим доступу : https://mdpi-res.com/d_attachment/polymers/polymers-12-02684/article_deploy/polymers-12-02684-v2.pdf?version=1605672997

References

1. Gholinjko V.I. Proektuvannja zasobiv indyvidualjnogho zakhystu pracujujuchykh : navch. posib. / V.I. Gholinjko, L.D. Tretjakova, S.I. Cheberjachko; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nac. ghim. un-t. – Dnipro : NGhU, 2017. – 181 s.
2. Tretjakova L. D. Novitni rishennja problemy indyvidualjnogho zakhystu pracivnykiv atomnykh elektrychnykh stancij: Monohrafiya / L. D. Tretjakova. – K.: Osnova, 2016. – 216 s.

3. Tretiakova L. Designing of rational structure of range of insulating protective clothing on the basis of the principles of transformation / L. Tretiakova, N. Ostapenko, M. Kolosnichenko, K. Pashkevich, T. Avramenko // *Vlakna a textil (Fibres and Textiles)*. – 2016. – Volume 23(4). – P. 27–35. – Rezhym dostupu : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42495/1/Designing_of_Rational_Structure.pdf
4. Kurghanskyj A. V. Rozrobka specialjnogo odjaghu dlja zakhystu vid pidvyshhenogho rivnja ionizujuchogho vyprominjuvannja : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.18.19 / Kurghanskyj Andrij Volodymyrovych ; Kyjiv. nac. un-t tekhnologij ta dyzajnu. – K., 2011. – 21 s.
5. Zakonodavstvo Ukrainy. [Elektronnyj resurs] : Postanova Kabinetu Ministriv vid 27 serpnja 2008 r. N 761 pro zatverdzhennja Tekhnichnogho rehhlamentu zasobiv indyvidualjnogo zakhystu vidpovidno do statii 14 Zakonu Ukrainy «Pro standarty, tekhnichni rehhlamenty ta procedury ocinky vidpovidnosti» (3164–15). Rezhym dostupu : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/761-2008-%D0%BF>.
6. Zasoby indyvidualjnogo zakhystu (IMAS 10.30:2013, IDT): DSTU-P IMAS 10.30:2016. – [Chynnyj vid 2016-07-01]. – K. : Derzhstandart Ukrainy, 2016. – 14 s. – (Nacionaljnyj standart Ukrainy).
7. Bezpeka u nadzvychajnykh situacijakh. Osnovni polozhennja : DSTU 3900.101:2014. – [Chynnyj vid 2014-07-01]. – K. : Derzhstandart Ukrainy, 2014. – 14 s. – (Nacionaljnyj standart Ukrainy).
8. Pracija Ukrainy u 2013 roci [Elektronnyj resurs] : Statystychnyj zbirnyk. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, 2014. – Rezhym dostupu : https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/publ11_u.htm.
9. Bezpechnistj promyslovykh pidpryjemstv. Terminy ta vyznachennja [Elektronnyj resurs] : DSTU 2156-93. – [Chynnyj vid 1995-01-01] – Rezhym dostupu : <http://document.ua/bezpechnist-promislovih-pidpriemstv-terminy-ta-vyznachennja-nor3429.html>.
10. Ivchuk Ju. Ju. «Bezpeka praci (bezpechni i zdorovi umovy praci)» jak komponenta «ghidnoji praci» v trudovomu pravi / Ju. Ju. Ivchuk // *Pravo ta innovaciji*. – 2015. – № 4. – S. 129–137.
11. Kolosnichenko M.V. Rozvytok naukovykh osnov stvorennja termozakhysnogho specialjnogo odjaghu : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.19.04 / Kolosnichenko Maryna Viktorivna ; Kyjivskij nacionaljnyj un-t tekhnologij ta dyzajnu. – K., 2004. – 376 s.
12. Kozhushko R. Ju. Rozrobka odjaghu dlja zakhystu vid radioaktyvnogho zabrudnennja : avtoref. dys... kand. tekhn. nauk: 05.18.19 / Kozhushko Roman Jurijovyh ; Kyjivskij nacionaljnyj un-t tekhnologij ta dyzajnu. – K., 2009. – 20 s.
13. Delkumburewatte G. B. Wearable cooling system to manage heat in protective clothing / G. B. Delkumburewatte, T. Dias. // *The Journal of the Textile Institute*. – 2012. – Vol. 103. – P. 483–489.
14. McLellan T. M. Protective clothing ensembles and physical employment standards / T. M. McLellan, G. Havenith. // *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. – 2016. – Vol. 41. – P. 121–130.
15. Ostapenko N. V. Rozvytok naukovykh osnov dyzajn-proektuvannja zakhysnogho odjaghu z vykorystannjam pryncypiv transformaciji : avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja dokt. tekhn. nauk : spec. 05.18.19 "tekhnologija tekstyljnykh materialiv, shve-jnykh i trykotazhnykh vyrobiv" / Ostapenko Natalija Valentynivna – Kyjiv, 2017. – 44 s.
16. Dydzajn-proektuvannja vyrobiv specialjnogo pryznachennja : navch. posib. / N.V. Ostapenko, M.V. Kolosnichenko, T.V. Lucker ta in. – K. : KNUITD, 2016. – 320 s.
17. Tranemo advanced workwear 2017 [Electronic resource]. – Mode of access : https://issuu.com/monelw/docs/tranemo_cat33_uk?e=11284842/42652323.
18. Katalog firmy BRISTOL Uniforms [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.bristoluniforms.com>.
19. Katalog firmy flamepro [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.flamepro.com>.
20. Katalog firmy Dräger [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.dräger.com.heimanfireequipment.com>.
21. Ostapenko N.V. Proektuvannja specialjnogo odjaghu / N.V. Ostapenko, O.V. Kolosnichenko // *Encyklopedija shvejnyh vyrobnyctva : navch. posib.* – K. : «Sammit-knygha», 2010. – 968 s.
22. Krjuchkova S.A. Doslidzhennja konstruktivno-tekhnologichnykh rishenj zakhysnogho odjaghu dlja pracivnykiv AES / S.A. Krjuchkova, N.V. Ostapenko, L.D. Tretjakova : tezy dopovidej KhII Vseukrajinskoji naukovoji konferenciji molodykh uchenykh ta studentiv [«Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi»], (25–26 kvitnja 2013r.) / M-vo osvity i nauky Ukrainy, KNUITD. – K. : KNUITD, 2013. – T.1. – S. 67.
23. Odjagh specialjnyj zakhysnyj. Zaghalni vymoghy (EN 340:1993, IDT) : DSTU EN 340-2001. – [Chynnyj vid 2003-07-01]. – K. : Derzhpozhyvstandart Ukrainy, 2003. – 12 s. – (Nacionaljnyj standart Ukrainy).
24. Ghalyk I. S. Tekstyljni materialy ta vyroby : tlumachnyj slovnyk / I. S. Ghalyk, B. D. Semak. – Ljviv : Vydavnytvo Ljvivskoj komercijnoji akademiji, 2010. – 224 s.
25. Ghalyk I. S. Shljakhy pidvyshhennja konkurentospromozhnosti vitchyznanogho tekstylju na rynkakh / I. S. Ghalyk, B. D. Semak // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2015. – № 2. – S. 97-102.
26. Nuclear Protective Clothing Market Rising Trends, Demand and Sales 2019 to 2025 [Electronic resource] // *The Ukiah Post*. – 2019. – Available at: <https://www.ukiahpost.com/nuclear-protective-clothing-market-rising-trends-demand-and-sales-2019-to-2025/>.
27. 34. Technical aspects of dissolvable protective clothing / [M. E. Courmoyer, D. L. Wannigman, S. Lee et al.]. // *Journal of Chemical Health and Safety*. – 2012. – Vol.19. – P. 2–11.
28. Struminska T. Designing of special clothing based on experimental researches of material properties / T. Struminska, S. Prasol, E. Kolosnichenko, N. Chuprina and N. Ostapenko // *Vlakna a textil (Fibres and Textiles)*. – 2019. – Volume 4. – P. 84–95. – Rezhym dostupu : http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT_2019_4_10.pdf
29. Sharan T. Gh. Udoshkonalennja vygotovlennja specodjaghu z pidvyshhenymy zakhysnymy vlastyvostjamy dlja robitnykiv metaloobrobnykh cekhiv : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.18.19 / Sharan Tetjana Ghryghorivna. – Khmeljnyckyj, 2012. – 153 s.
30. Horiashchenko S. Mechanical properties of polymer coatings applied to fabric / S. Horiashchenko, J. Musiał, K. Horiashchenko, R. Polasik, T. Kałaczyński // *Polymers*. – 2020. – Volume 12 (11). – 2684. – Rezhym dostupu : https://mdpi-res.com/d_attachment/polymers/polymers-12-02684/article_deploy/polymers-12-02684-v2.pdf?version=1605672997

СТРЕЛЬБИЦКИЙ В. В.

Одесский национальный морской университет

<https://orcid.org/0000-0001-7027-9498>e-mail: vict141174@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ НА РЕСУРС МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ МОСТОВИХ КРАНІВ МОРСЬКИХ ПОРТІВ

В роботі наведено результати досліджень мостових кранів, які експлуатують у закритих складах морських портів. Проаналізовані дефекти, які виникають у процесі їх експлуатації. Отримані результати вказують на те, що найбільш навантаженим елементом є кінцеві балки мостових кранів. За допомогою магнітного (коерцитиметричного) методу проаналізовано стан їх кінцевих балок, проведений аналіз результатів показав, що два крани слід негайно припинити експлуатувати.

Ключові слова: мостовий кран, механізм пересування, коерцитивна сила, ресурс.

Victor STRELBITSKIY

Odessa National Maritime University, Odessa

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE MOVEMENT MECHANISM ON THE RESOURCE OF METAL STRUCTURES OF OVERHEAD CRANES OF SEAPORTS

Overhead cranes are widely used when performing reloading operations on closed ones (fig.1) and open warehouses of sea and river ports. Since they are a link in the technological process, the productivity of Port lines depends on their reliable and continuous operation.

Overtime and long term operation of metal structures of overhead cranes in the mode of intensive cyclic loading leads to the formation of fatigue defects and subsequent failure of components and accidents. The main criterion for achieving the maximum condition of metal structures is considered to be the development of its resource, and their technical diagnostics and expert examination remain the method of establishing the real condition of cranes.

The paper presents the results of studies of overhead cranes that are operated in closed warehouses of seaports.

The 8 bridge cranes of the same type were selected for research, with a load capacity of 10 tons, which are made of BCm3cn5 steel, operate in Hook mode and operate in closed warehouses of ports. The crane travel path did not exceed 24 m.

To assess the stress-strain state of metal structures of end beams, the method of magnetic (coercimetric) monitoring using a KPM-Ц-K2M magnetic structuroscope was used. The measurements were carried out over three years, with a frequency of 1 time per year. On the metal structure of the crane, it was necessary to select the area where the force effect on the metal was the least during operation, and the values of the coercive force (a/CM) were measured. The obtained values are comparable to the passport values, the difference did not exceed 10%.

Experimentally, it was found that the most loaded node of the overhead crane is the end beams, since they have the greatest amount of damage. It was found that the greatest stresses occur in the attachment point of the corner axle boxes of the running wheels on the end beams, which are affected by vertical loads and transverse horizontal forces that occur when the crane moves. Two cranes have been found to have emergency cracks, so they need to be repaired or replaced. To obtain objective information, it is necessary to periodically monitor and regularly enter the NS value in the work log, while noting the actual values and intensity of the load.

Keywords: overhead crane, travel mechanism, coercive force, resource.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Мостові крани широко використовуються при виконання перевантажувальних операцій на закритих (рис.1) та відкритих складах морських та річкових портів.

Оскільки вони є ланкою технологічного процесу, тому від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових ліній.

Проте, на сьогодні в Україні не спостерігається переоснащення портів у повному об'ємі, так як заміна усіх згаданих кранів вимагає значних інвестицій. Тому більше 85% кранів відпрацювали нормативний термін служби експлуатують [1-2].

Понаднормова та тривала експлуатація металоконструкцій мостових кранів в режимі інтенсивного циклічного навантаження призводить до утворення втомних дефектів та подальшої відмови вузлів та аварій [1-2].

Основним критерієм досягнення граничного стану металоконструкцій вважають вироблення її ресурсу, а методом встановлення реального стану кранів - залишаються їх технічне діагностування та експертне обстеження [1-3]. За результатами яких прийняти рішення про їх подальшу експлуатацію.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз проведених досліджень металевих конструкцій мостових кранів які попрацювали значний термін показав що:

1) дефекти у металоконструкціях можуть виникати у процесі тривалої експлуатації, при використанні кранів не за призначенням, а також внаслідок конструктивних недоробок і недоліків виготовлення та монтажу кранів [1-3,5];

- 2) термін напрацювання неоднозначно впливає на механічних характеристиках матеріалів [1,3,5]
 - 3) виявлені корозійні пошкодження у вигляді виразок чи поверхневих ушкоджень, носять випадковий характер та впливають істотно на залишкову довговічність [5];
 - 4) руйнування металоконструкцій в процесі експлуатації передусім пов'язано з циклічними навантаженнями в процесі експлуатації, які сприяють утворенню мікротріщин, котрі у подальшому в макротріщини та поширюється в тіло металоконструкції [1-3,5];
 - 5) безпека експлуатації мостових кранів, які відпрацювали нормативний термін працездатності, напряду залежить від характеристик тріщиностійкості металу кінцевих балок [1-3,5];
 - 6) оцінка технічного стану є індивідуальною для кожного крану [1-3,5].
- Однак, вплив механізму пересування на ресурс металоконструкцій мостових кранів які пропоявляли більше 20 років у морських портах, на сьогодні в науковій літературі розглянуто недостатньо.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження стану вузлів та вплив механізму пересування на ресурс металоконструкцій мостових кранів з понаднормовими термінами експлуатації у закритих складах морських портів.

Виклад основного матеріалу

Для досліджень було обрано 8 мостових однопісних кранів (рис.1), вантажопідйомністю 10 тон, які виготовлені за сталі ВСт3сп5, працюють у крюковому режимі та експлуатують у закритих складах портів. Шлях переміщення кранів не перевищував 24 м.

Візуальний огляд всіх металевих конструкцій кранів відбувався протягом двох років роботи, через кожні 3 місяці.

Аналіз проведених досліджень показав що:

- 1) у віх кранів знос коліс перевищує граничні значення ;
- 2) у 75 кранів тріщини в основному металі кінцевих балок (рис.2,а)



Рис. 1. Фото досліджуваного крана

- 3) у третини кранів виявлені тріщини у зварних з'єднаннях головної та кінцевої балок (рис 2,а);
- 4) у 80% кранів виявлені тріщини в кутах верхнього й нижнього вирізів вертикальних листів під болтові з'єднання букс тріщини в кутах верхнього й нижнього вирізів вертикальних листів під болтові з'єднання букс
- 5) у всіх кранах були зафіксовані тріщини у місцях кріплення головних балок з кінцевими (рис.2,б та в)
- 6) у половині кранів виявлені тріщини в місцях приварки крайок ребер жорсткості до поясу балки (рис.2,а);

- 7) у 80% кранів виявлені тріщини в кінцях косинок, що з'єднують головні і кінцеві балки (рис.2,в).

У двох кранах виявлені тріщини аварійного характеру, т.т. вимагають їх ремонту або заміни.

Аналіз результатів досліджень показав, що виявлені тріщини у балках виникають внаслідок порушення умов експлуатації, інтенсивного зносу коліс, зміни характеристики кранового шляху та утворених сил перекоосу, а також вібраційних навантажень які виникають у процесі роботи та призводяться до зміни напружено-деформованого стану елементів крана [2].

Місце зародження і конфігурація втомних тріщин свідчить про те, що вони утворюються від дії навантажень, які викликані, головним чином, силовою взаємодією коліс крана з рейками при його русі уздовж шляхів.

Пошкодження зварних мостів, є наслідком інтенсивному зношуванню реборд коліс внаслідок дії поперечних сил у контакті колесо-рейок при русі кранів з монтажним перекоосом їх ходових коліс у горизонтальній площині.

Було встановлено, що найбільші напруження вникають у вузлі кріплення кутових букс ходових коліс на кінцевих балках, на які діють вертикальні навантаження і поперечні горизонтальні зусилля, котрі виникають при русі крана. Горизонтальні зусилля концентруються в буксових частинах кінцевих балок у вигляді крутного моменту, котрий утворений силою перекоосу. Зміна крутного моменту у процесі руху призводить до появи у вузлі кріплення знакозмінних напружень, частота яких залежить від числа включень механізму пересування крана.

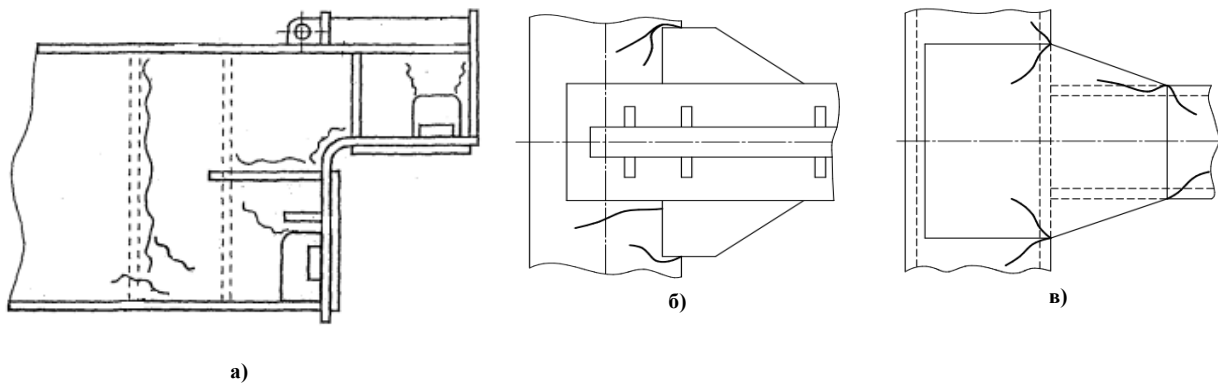


Рис. 2. Тріщини у кінцевих балках (а), місцях з'єднання головної та кінцевої балок (б,в)

Для оцінки напружено-деформованого стану металоконструкцій кінцевих балок застосовано метод магнітного (коерцитиметричного) контролю за допомогою магнітного структуроскопа КРМ-Ц-К2М (рис.3) [6,7]. Головною перевагою приладу полягає у тому, що на показання приладу впливають властивості металу, не впливають захисні покриття (фарби, плівки та ін.) товщиною до 6 мм та корозія, шорсткість, кривизна поверхні тощо [6,7]. Вимірювання проводились протягом трьох років, з періодичністю 1 раз в рік.



Рис. 3. Структуроскоп (коерцитиметр) КРМ-Ц-К2М

Слід відмітити, що магнітна діагностика по коерцитивній силі реагує лише на структурну перебудову та залишкові напруження, виявляючи напрямок дії головних сил в усьому контрольованому об'ємі металу.

Схема контрольних точок вимірювання коерцитивної сили наведена на рис.4, а,в.

На металоконструкції крана було вибрати ділянку, на якій силовий вплив на метал був найменшим у процесі експлуатації, та виміряні значення коерцитивної сили H_C^0 (А/см). Отримані значення порівняні з паспортними, різниця не перевищувала 10%.

Далі, вимірювали коерцитивну силу у контрольних точках (рис.4,а та б). У кожній точці кран вимірювання проводили тричі, отримані значення усереднювали.

За результатами товщинометрії, згідно вимог [4], складені відповідні протоколи та внесені відмітки у паспорт крана.

Результати вимірювань наведені на рис.4,в.

Отримані експериментальні величини H_C порівнювали зі значеннями для відповідної марки сталі (рис.5.) [8]. Наведені діаграми дозволяють вирішувати зворотні задачі — тобто визначати рівень діючих чи залишкових напружень у конструкції за даними контролю величини коерцитивної сили.

Аналіз отриманих даних вказує на те, що:

1) два крани слід негайно припинити експлуатувати, оскільки у них виявлені тріщини аварійного характеру, магнітний контроль показав що ресурс їх експлуатації практично вичерпано;

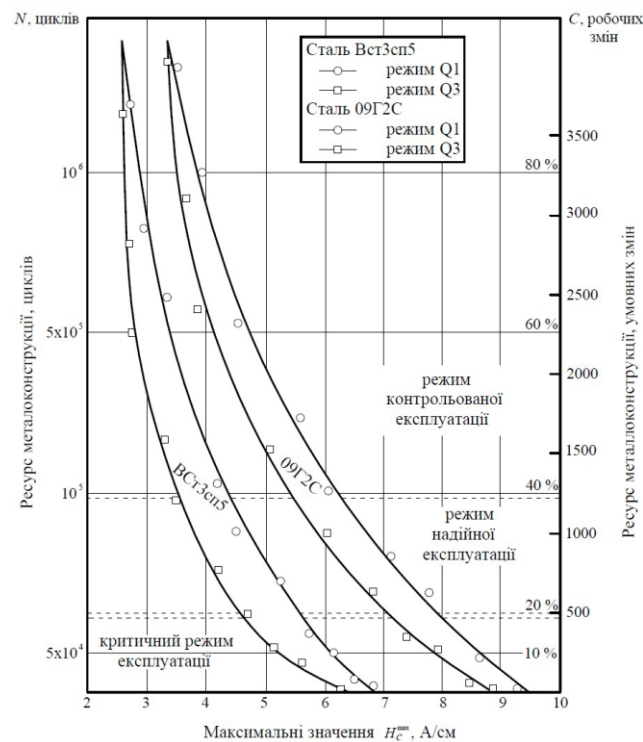
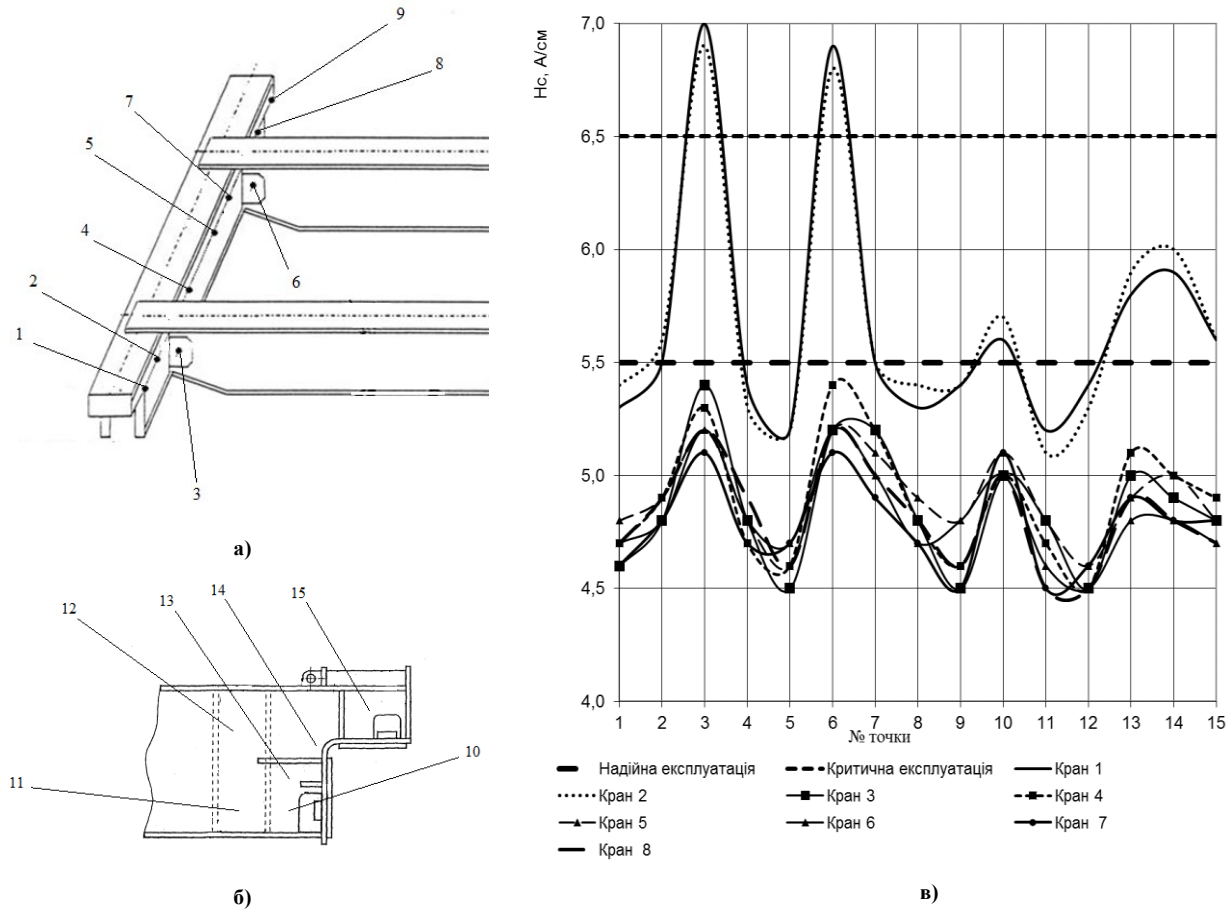
2) крани наблизилися до режиму критичної експлуатації, тобто метал металоконструкцій знаходиться на стадії вичерпання запасу пластичності, причому залишкові напруження у них перевищують межу плинності для відповідної марки сталі.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Експериментальним шляхом біло встановлено, що найбільш навантаженим вузлом мостового крана є кінцеві балки, так як у них виявлено найбільшу кількість пошкоджень. Було встановлено, що найбільші напруження виникають у вузлі кріплення куткових букс ходових коліс на кінцевих балках, на які діють вертикальні навантаження і поперечні горизонтальні зусилля, котрі виникають при русі крана.

У двох кранах виявлені тріщини аварійного характеру, тому їх необхідно ремонтувати або замінити.

Для отримання об'єктивної інформації необхідно здійснювати періодичний контроль і регулярно заносити значення H_C у робочий журнал, зазначаючи при цьому фактичні значення та інтенсивність навантаження.



Література

1. Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напруження на тріщиностійкість сталей мостових кранів / В.В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 4. – Т.1 – С. 138–142.
2. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини: Навч. посібник. — Харків: НТУ «ХП», 2005. — 304 с.
3. Немчук О. О. Особливості діагностування технічного стану сталей портового перевантажувального обладнання / О. О. Немчук // Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 2017. - Т. 53, № 6. - С. 116-118.
4. ОМД 00120253.001-2005 Методика проведення експертного обстеження (технічного діагностування) кранів мостового типу. [Чинний від 2006-11-15]. Вид. офіц. Х.: Науково-дослідний, проектно-технологічний та конструкторський інститут «Укркраненерго», 2005. 160 с.
5. Стрельбіцький В.В., Яременко В.А. Аналіз дефектів мостового крана вантажопідйомністю 10 тон. Матеріали V Міжнародна науково-практична конференція «Trends in science and practice of today», 19-22 жовтня 2021р., Анкара, Туреччина. – 2020. – № 4. – Т.1 – С. 138–142.
6. Григоров О. В. Метод аналізу вимірювань коерситивної сили під час технічної діагностики металоконструкцій кранів з різними товщинами елементів / О.В. Григоров, С.О. Губський, В.А. Попов, М.Ф. Хорло // Метрологія та прилади. – 2009. – №5. – С. 51–55.
7. МВ 0.00-7.01-05. Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу. – К. : 2005. - 77 с..
8. Григоров О.В., Аніщенко Г.О., Петренко Н. О. Металеві конструкції Металеві конструкції підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх, меліоративних машин. – Харків : НТУ «ХП», 2011, - 516 с

References

1. Strelbitskiy V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratiuvannia na trishchynostiikist stalei mostovykh kraniv / V.V. Kukhar // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 4. – Т.1 – С. 138–142.
2. Hryhorov O. V., Petrenko N. O. Vantazhopidiomni mashyny: Navch. posibnyk. — Kharkiv: NTU «KhPI», 2005. — 304 s.
3. Nemchuk O. O. Osoblyvosti diahnostuvannia tekhnichnoho stanu stalei portovoho perevantazhuvalnoho obladnannia / O. O. Nemchuk // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. - 2017. - Т. 53, № 6. - С. 116-118..
4. OMD 00120253.001-2005 Metodyka provedennia ekspertnoho obstezhennia (tekhnichnoho diahnostuvannia) kraniv mostovoho typu. [Chynnyi vid 2006-11-15]. Vyd. ofits. Kh.: Naukovo-doslidnyi, proektno-tekhnolohichni ta konstruktorskyi instytut «Ukrkranenerho», 2005. 160 s...
5. Strelbitskiy V.V., Yaremenko V.A. Analiz defektiv mostovoho kрана vantazhopidiomnistiu 10 ton. Materialy V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Trends in science and practice of today», 19-22 zhovtnia 2021r., Ankara, Turechchyna. – 2020. – № 4. – Т.1 – С. 138–142..
6. Hryhorov O. V. Metod analizu vymiriuvan koertsyivnoi syly pid chas tekhnichnoi diahnostryky metalokonstruktsii kraniv z riznymi tovshchynamy elementiv / O.V. Hryhorov, S.O. Hubsnyi, V.A. Popov, M.F. Khorlo // Metrolohiia ta prylady. – 2009. – №5. – С. 51–55
7. MV 0.00-7.01-05. Metodychni vkazivky z provedennia mahnitnoho kontroliu napruzhenodeformovanoho stanu metalokonstruktsii pidiomnykh sporud ta vyznachennia yikh zalyshkovoho resursu. – K. : 2005. - 77 s..
8. Hryhorov O.V., Anishchenko H.O., Petrenko N. O. Metalevi konstruktsii Metalevi konstruktsii pidliomno-transportnykh, budivelnnykh, dorozhnykh, meliorativnykh mashyn. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2011, - 516 s

ФІНИК І. В.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3254-9236>e-mail: Finyk_Ira@i.ua

МЕТОДИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ

Розглянуто методи інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах при використанні альтернативних джерел енергії. Запропоновано розподіл за класами активних і пасивних методів інтенсифікації теплообміну. Виділено три найефективніших методи інтенсифікації теплообміну: метод турбулізації потоку в пристінних зонах, заснований на цілеспрямованому штучному створенні невеликих вихрових пристінкових зон, що є джерелом додаткової турбулізації потоку; метод закрутки потоку всередині витих овальних труб і при продольному та поперечному обтіканні щільно упакованих пучків витих труб і стержнів; метод керованого відриву прикордонного шару при поперечному обтіканні пучків труб за допомогою створення на них турбулізаторів. Визначено, що на практиці найбільш ефективним є використання комбінованих методів інтенсифікації. Важливими умовами при виборі методу інтенсифікації теплообміну є: величина допустимих енергозатрат на інтенсифікацію теплообміну і вид наявної для цього енергії; конкретизація задачі інтенсифікації теплообміну в конкретному класі обладнання; технологічність виготовлення обладнання з інтенсифікацією теплообміну, доступність при закупівлі та довговічність в експлуатації обладнання; характер розподілу, структура теплових потоків і температурних полів, в яких виникає потреба інтенсифікації теплообміну. Запропоновано основний економічний показник інтенсифікації процесу теплообміну в обладнанні – економічна ефективність процесу, тобто процес повинен бути економічно вигідним. З вищесказаного випливає, що не може розглядатися інтенсифікація теплообміну ізольовано від необхідних витрат енергії. Визначальним критерієм оптимізації прийнято ефективність процесу теплообміну при заданому рівні енерговитрат на перекачування робочого середовища через обладнання. Особливе значення має інтенсифікація теплообміну під час використання газоподібних робочих середовищ, для яких характерні зниження інтенсивності процесів теплообміну та високі витрати енергії на подолання опорів при перекачуванні газів. Завдання інтенсифікації теплообміну зазвичай зводяться: до зменшення габаритів та маси теплообмінних пристроїв; до зниження температурного тиску, тобто до зниження температури стінок при заданій температурі теплоносія або до підвищення температури теплоносія при заданій температурі стін. Зменшення товщини тепло передаючої стінки і підвищення її теплопровідності, а також запобігання відкладень забруднення на стінці є очевидними ознаками інтенсифікації теплообміну.

Ключові слова: інтенсифікація теплообміну, біогазовий реактор, альтернативне джерело енергії.

Iryna FINYK

Vinnytsia National Technical University

IMETHODS OF INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE IN BIOGAS REACTORS

Proposed research method intensification of heat exchange in biogas reactions using alternative energy sources. The distribution of active and passive methods of heat exchange intensification is determined. The three most effective methods of heat exchange intensification are identified: the method of flow turbulence in the adjacent areas, based on purposeful artificial creation of small dry wall zones, which is the source of additional flow turbulence; the method of flow winding inside the twisted oval tubes and at longitudinal and transverse winding of tightly packed beams and tubes; the method of controlled break-out of the boundary layer at transverse tubulars by creating turboblocators on them. It is determined that in practice the most effective is the use of combined methods of intensification. The important conditions for choosing the method of heat exchange intensification are: the amount of permissible energy costs for heat exchange intensification and the type of energy available for this energy; the task of heat exchange intensification in a particular class of equipment; the technological capacity of equipment with heat exchange intensification, availability at purchase and durability in operation of equipment; the nature of distribution, structure of thermal flows and temperature fields, in which there is a need for intensification of heat exchange. The main indicator of intensification of the heat exchange process in the equipment is found – the efficiency of the process, that is, the process should be economically profitable. From the above it appears that the intensification of heat exchange can't be considered isolated from the necessary energy costs. The determining criterion of optimization is the efficiency of the heat exchange process at a given level of energy consumption at transfer of the working environment through the equipment. Heat exchange intensification during use of gaseous working environments is of particular importance, for which characteristic reduction of intensity of heat exchange processes and high energy consumption for removal of supports at pumping of gases is characteristic. Tasks of heat exchange intensification are usually set: to reduce the size and weight of heat exchange devices; to decrease the temperature pressure, i.e. to decrease the temperature of the walls at the given temperature of heat carrier or to increase the temperature of heat carrier at the given temperature of walls. Reduction of thickness of heat transfer wall and increase of its thermal conductivity, as well as prevention waste contamination on the wall is an obvious method of intensification of heat exchange.

Keywords: heat exchange intensification, biogas reactor, alternative energy source.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні диктує необхідність вирішення однієї з найбільш актуальних проблем – зменшення енергоспоживання, в першу чергу зменшення використання природного газу, нафти і вугілля. Розвиток та нові прогресивні здобутки суспільства стають неможливими без енергозатрат. На сьогодні навіть мінімальна людська діяльність не здійснюється без використання енергії. Найменше, що загрожує людству в майбутньому, при використанні традиційних енергоресурсів в темпі сьогоднішнього дня, це зменшення запасів енергосировини і збільшення розцінок на паливо. При постійному зрості вартості звичних для нас

видів палива, а також зменшенні видобутку зростає потреба у використанні альтернативних джерел енергопостачання, які хоча б частково зможуть задовольнити постійно зростаючу потребу в енергоресурсах. Альтернативні джерела енергії є саме такими джерелами енергії, що постійно поновлюються. Одним із шляхів альтернативного енергопостачання є використання процесів анаеробного бродіння в біогазових реакторах. Біогаз – суміш газів, основною складовою якого є метан, може використовуватися як паливо. Але зменшення споживання енергії на виробництво біогазу, зменшення капітальних витрат на будівництво реакторів, покращення процесів бродіння можна досягнути шляхом інтенсифікації теплообмінних процесів між нагрівальним елементом реактора і субстратом. Сучасні реалії нестабільності в багатьох сферах життя потребують більш детального дослідження практичного використання відновлювальних видів енергії і визначення оптимальних методів для інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах, застосовуючи альтернативні джерела енергії [1].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення та класифікація оптимальніших методів інтенсифікації теплообміну в біогазових реакторах за використання альтернативних джерел енергії.

Виклад основного матеріалу

Проблема ефективного та раціонального використання паливних енергоресурсів є однією з найважливіших на сьогоднішній день. Важливу роль у вирішенні цієї проблеми може внести поширення застосування ефективних методів інтенсифікації теплообміну при розробці і виготовленні обладнання [2]. На даний час розроблені та досліджуються найрізноманітніші методи інтенсифікації теплообміну. Принципово їх класифікують на два типи: пасивні та активні. Пасивний тип інтенсифікації: впливання на потік формою поверхні теплообміну, застосування вставних інтенсифікаторів, різнотипне оребрення поверхні теплообміну. Пасивний тип інтенсифікації теплообміну можна умовно поділити на наступні основні групи: надання потоку рідини обертально-поступального руху; руйнування пристінних шарів рідини; збільшення поверхні теплообміну. Активний тип інтенсифікації: застосування механічного впливу на теплообмінну поверхню, вплив на потік електричними акустичними чи магнітними полями, тисковими пульсаціями, відсмоктуванням або вдуванням робочого середовища через пористу поверхню. Перший спосіб полягає у створенні закрученого руху потоку за допомогою стрічкових, шнекових та пластинчастих завихрювачів. Такі завихрювачі впливають на весь потік. Другий спосіб полягає у впливові на пристінну область течії за рахунок штучної шорсткості у вигляді різного типу накаток на внутрішній стінці труб, дротяних спіралей тощо [3].

Проводячи дослідження виникає можливість виділити три найефективніших методи інтенсифікації теплообміну:

1. Метод турбулізації потоку в пристінних зонах, заснований на цілеспрямованому штучному створенні невеликих вихрових пристінкових зон, що є джерелом додаткової турбулізації потоку [4]. Процес турбулізації потоку гомогенізує гетерогенні системи і інтенсифікує технологію отримання двофазних середовищ. Для надання характеристики даній методиці, слід звернутися до рівняння Нав'є-Стокса, не приймаючи до уваги прискорення поля зовнішніх масових сил та перепад тиску в об'ємі рідини, оскільки вони мізерні в порівнянні з інерційними силами і силами тертя. Нехтуючи вищезгаданими величинами рівняння матиме такий вигляд :

$$\frac{Dw_i}{d\tau} = \nu \nabla^2 w_i, i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

де D – оператор диференціювання; w_i – кутова швидкість; τ – час; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; ∇ – оператор Набла, d – діаметр каналу [5].

2. Метод закрутки потоку всередині витих овальних труб і при продольному та поперечному обтіканні щільно упакованих пучків витих труб і стержнів [4]. Щоб характеризувати інтенсивність закрутки потоку запропоновано параметр (2):

$$n = \frac{8 \cdot M_{сер}}{\pi \cdot K_{сер} \cdot d}, \quad (2)$$

де $M_{сер}$ – момент кількості руху потоку (середнє значення); π – математична константа, 3,14; $K_{сер}$ – кількість руху (середнє значення).

На основі дослідження можна припустити, що інтенсивність закручування потоку завихрителем доцільно характеризувати рівнянням (3):

$$\Phi_{0_{ax}}^r = \frac{M}{(K_1 + K_2) \cdot R}, \quad (3)$$

де $\Phi_{0_{ax}}^r$ – інтенсивність закручування потоку завихрителем; K_1 – осьова кількість руху; K_2 – кількість руху закрученої течії; R – радіус каналу.

Для шнекового завихрителя, з кроком по довжині і прямокутною канавкою актуальним буде дане рівняння (4):

$$\Phi_{0_{\text{ак}}}^{\Gamma} = \frac{1 + \bar{d}_0^2}{1 + \bar{d}_0} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{сер}}, \quad (4)$$

де $\varphi_{\text{сер}}$ – геометричний кут закручування на середньому значенні діаметру.

Реальне значення інтенсивності закручування потоку відрізнятиметься від наведених формул. Це зумовлено нерівністю швидкостей полів в каналах завихрителів, гідравлічними втратами на тертя. Для шнекового завихрителя з прямокутною канавкою, рівняння, що пов'язує дійсний і розрахунковий метод матиме такий вигляд (5) [5]:

$$\Phi_{0_{\text{ак}}} = 1,28 \cdot \Phi_{0_{\text{ак}}}^{\Gamma^{0,75}}, \quad (5)$$

3. Метод керованого відриву прикордонного шару при поперечному обтіканні пучків труб за допомогою створення на них турбулізаторів [4].

Для біогазових реакторів анаеробного бродіння характерні процеси, які протікають під впливом рушійної сили, визначеної різницею концентрації, тиску, швидкості, температури, зовнішнього та внутрішнього силових полів. Аналізуючи процес, можемо представити рівняння (6) в такому вигляді:

$$R = \kappa \cdot x \cdot A \cdot \tau, \quad (6)$$

де R – результативність процесу; κ – коефіцієнт пропорційності, характеризуючий швидкість процесу; x – інтенсивність процесу; A – рушійна сила; τ – час процесу.

Інтенсивність процесу є пропорційною рушійній силі процесу і обернено пропорційній опору. З цієї залежності можемо вивести рівняння (7):

$$R = \frac{\kappa \cdot x \cdot A}{r}, \quad (7)$$

де r – опір.

З метою інтенсифікації теплообміну, пропонується застосування анаеробних метаногенеруючих реакторів з іммобілізацією на твердих носіях мікроорганізмів.

Інтенсифікація теплообміну всередині шару стає можливою при зміні поза шаром концентрації субстрату. Масообмін поза шаром відбувається за допомогою дифузії, визначеної різницею градієнтів тиску і швидкості. При зміні тиску в потоці субстрату стає можливою інтенсифікація виділення газу, рух якого до поверхні стимулює масообмін. Інтенсифікація виділення газу підтверджується законом Генрі (8), згідно з яким кількість газу, що розчиняється в рідині при коефіцієнті розчинності газу є прямопропорційною абсолютному тиску в рідині:

$$W_g = K_{\Gamma} \cdot P, \quad (8)$$

де W_g – кількість газу; K_{Γ} – константа Генрі; P – абсолютний тиск в рідині.

Основні рушійні сили поза шаром в анаеробних реакторах, є рушійними силами визначеними різницею швидкості і тиску. Інтенсифікація теплообміну можлива за рахунок оптимізації рушійних сил [5].

На сьогоднішній день використовуються різні типи методи інтенсифікації теплообміну. На практиці найбільш ефективним є використання комбінованих методів інтенсифікації. Необхідно звернути увагу, що при практичному застосуванні методів інтенсифікації теплообміну виникає потреба враховувати не лише ефективність методу, а й особливості експлуатації та вартість обслуговування конструкції. Будь-який ефективний метод інтенсифікації теплообміну може бути реалізований лише тоді, коли розроблена прийнятна для серійного виробництва технологія виготовлення обладнання. Важливими умовами при виборі методу інтенсифікації теплообміну є:

1. Величина допустимих енергозатрат на інтенсифікацію теплообміну і вид наявної для цього енергії.
2. Конкретизація задачі інтенсифікації теплообміну в даному класі обладнання.
3. Технологічність виготовлення обладнання з інтенсифікацією теплообміну, доступність при закупівлі та довговічність в експлуатації обладнання.
4. Характер розподілу, структура теплових потоків і температурних полів, в яких виникає потреба інтенсифікації теплообміну [6].

Інтенсивність процесу теплообміну в обладнанні визначається відношенням теплової продуктивності апарату до основних величин, які характеризують рушійну силу процесу і розмір приладу. Для установки відповідно, інтенсивність визначається відношенням кількості переданого тепла за одиницю часу до температурного напору і площі поверхні теплообміну. Загальна інтенсивність процесу теплопередачі через

стінку дозволяє характеризувати коефіцієнт теплопередачі $-k$. Для плоскої стінки k , $\frac{Bm}{m^2 * K}$, описується рівнянням (9):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (9),$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від нагрітого середовища до стінки, і навпаки, $\frac{Bm}{m^2 * K}$; $\delta_1, \delta_2, \delta_{cm}$ – товщина шарів сторонніх відкладень на стінці зі сторони гріючого середовища і нагрівуючої стінки, m ; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{cm}$ – теплопровідність відкладень на стінках зі сторони гріючого середовища і нагрівуючої стінки, $\frac{Bm}{m * K}$.

Аналізуючи рівняння (9) можна зробити висновок, що коефіцієнт теплопередачі або ступінь інтенсивності теплообміну залежить в значній мірі від найбільшого із термічних опорів. Отже, для інтенсифікації процесу теплообміну необхідно перш за все зменшити термічний опір з тієї сторони, з якої він являється найбільшим. Зазвичай найбільший термічний опір мають $\frac{1}{\alpha_1}$ або $\frac{1}{\alpha_2}$.

Переміщення робочих середовищ і інтенсифікація теплообміну нерозривно пов'язані з енергозатратами на їх реалізацію. Інтенсифікація процесів теплопередачі призводить до зменшення необхідної площі поверхні теплообміну, габаритних розмірів обладнання, їх металоємності і вартості. Відповідно, можна знизити вартість закупки, експлуатації та ремонту пристроїв, тобто зменшити наведені затрати на процес теплообміну. Основний економічний результат інтенсифікації процесу теплообміну в обладнанні – це економічна ефективність цього процесу, тобто процес повинен бути економічно вигідним. З вищесказаного випливає, що не може розглядатися інтенсифікація теплообміну ізолювано від необхідних витрат енергії. Визначальним критерієм оптимізації є ефективність процесу теплообміну при заданому рівні енерговитрат на перекачування робочого середовища через обладнання. Особливе значення має інтенсифікація теплообміну під час використання газоподібних робочих середовищ, для яких характерні зниження інтенсивності процесів теплообміну та високі витрати енергії на подолання опорів при перекачуванні газів [7].

Як приклад, можна розглянути біогазовий реактор з інтенсифікацією теплообміну зображений на рис. 1. В даному реакторі Інтенсифікація теплообміну в надає можливість зменшити площу теплообмінного апарату в реакторі, знизити собівартість біогазового реактора та призвести до термостабілізації процесу бродіння [8].

За типом конструкції біогазові установки поділяються на одnoreакторні і багатореакторні. Перевагою багатореакторної установки є можливість роботи з субстратами швидкого розщеплення, які мають схильність до гідролізу і окислення і потребують використання двохступеневої технології, за допомогою якої досягається більший рівень виробництва біогазу [9].

Технологічно найважливішою конструкцією в біогазовій установці є створення досконалого біогазового реактору – спеціально утепленої ізолюваної ємності, в яку завантажуються біомаса (вручну або за допомогою навантажувачів), де сформовані особливі умови для процесу сприяючого активному розвитку і життєдіяльності анаеробних бактерій – анаеробного зброджування. Такий резервуар забезпечує вивід отриманого в результаті діяльності бактерій біогазу – газу, отриманого за допомогою бродіння біомаси.

Призначенням такого обладнання є формування необхідних умов для нормального функціонування культивованих бактерій і видалення газу, отриманого в результаті цієї життєдіяльності. Для забезпечення нормального протікання процесів бродіння потрібно створити необхідні умови в біогазовому реакторі: термофільний, мезофільний чи кріофільний температурний режим бродіння субстрату, необхідний рівень рН та концентрації сухої речовини.

Також необхідно забезпечити низьку концентрацію токсичних сполук і необхідну площу поверхні окремих частинок переробленої біомаси. З метою прискорення ферментаційної реакції окремих груп сировини потрібне застосування гідролізного реактора і 2-ступінчастої технології. Це дозволяє правильно контролювати параметри рН. Накопичений біогаз очищають і відправляють споживачам. Один кубічний метр біогазу в перерахунок на теплоту згоряння відповідає: 0,75 м³ природного газу; 0,61 кг бензину; 0,72 кг мазуту; 1,48 кг дров [10, 11].

Найбільш ефективними вважаються біореактори, які працюють в термофільному режимі 43–62°C. На таких установках з трьохденною ферментацією вихід біогазу складає 4,5 л на кожен літр корисного об'єму біореактора.

Завдання інтенсифікації теплообміну зазвичай зводяться до зменшення габаритів та маси теплообмінних пристроїв; до зниження температурного тиску, тобто до зниження температури стінок при заданій температурі теплоносія або до підвищення температури теплоносія при заданій температурі стін.

Зменшення товщини теплопередаючої стінки і підвищення її теплопровідності, а також запобігання відкладень забруднення на стінці є очевидними методами інтенсифікації теплообміну [2].

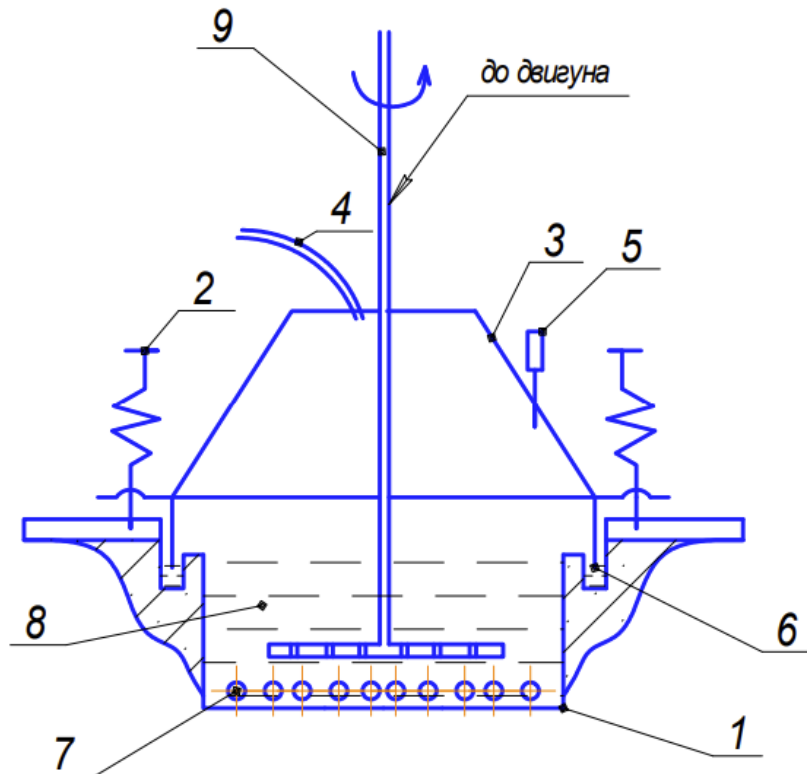


Рис.1 Типова конструкція біогазового реактора з інтенсифікацією теплообміну : 1- корпус реактора, 2 напрямні ковпака, 3 – кришка реактора, 4 – труба відведення газу, 5 - манометр, 6- гідрозатвор, 7 – нагрівальний елемент, 8 – субстрат, 9 – активатор теплообміну - мішалка [2]

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Встановлено, що важливе значення у вирішенні проблеми ефективного та раціонального використання паливних енергоресурсів може внести поширення застосування альтернативних джерел енергії, одним з яких є біогаз. Виробництво біогазу потребує ефективних методів інтенсифікації теплообміну при розробці і виготовленні обладнання біогазових станцій. На даний час розроблені та досліджуються найрізноманітніші методи інтенсифікації теплообміну. Принципово їх класифікують на два типи: пасивні та активні. Проводячи дослідження виникає можливість виділити три найефективніших методи інтенсифікації теплообміну:

1. Метод турбулізації потоку в пристінних зонах, заснований на цілеспрямованому штучному створенні невеликих вихрових пристінкових зон, що є джерелом додаткової турбулізації потоку.
2. Метод закрутки потоку всередині витих овальних труб і при продольному та поперечному обтіканні щільно упакованих пучків витих труб і стержнів.
3. Метод керованого відриву прикордонного шару при поперечному обтіканні пучків труб за допомогою створення на них турбулізаторів.

На практиці найбільш ефективним є використання комбінованих методів інтенсифікації. Необхідно звернути увагу, що при практичному застосуванні методів інтенсифікації теплообміну реалізація можлива лише тоді, коли розроблена прийнятна для серійного виробництва технологія виготовлення обладнання, враховується не лише ефективність методу, а й особливості експлуатації та вартість обслуговування конструкції.

Інтенсифікація процесів теплопередачі призводить до зменшення необхідної площі поверхні теплообміну, габаритних розмірів обладнання та маси теплообмінних пристроїв, їх металоємності і вартості; до зниження температурного тиску, тобто до зниження температури стінок при заданій температурі теплоносія або до підвищення температури теплоносія при заданій температурі стін.

Відповідно, можна знизити вартість закупки, експлуатації та ремонту пристроїв, зменшити наведені затрати на процес теплообміну і процес стане економічно вигідним. З вищесказаного випливає, що не може розглядатися інтенсифікація теплообміну ізольовано від необхідних витрат енергії. Визначальним критерієм оптимізації є ефективність процесу теплообміну при заданому рівні енерговитрат на перекачування робочого середовища через обладнання. Особливе значення має інтенсифікація теплообміну під час використання газоподібних робочих середовищ, для яких характерні зниження інтенсивності процесів теплообміну та високі витрати енергії на подолання опорів при перекачуванні газів.

Зменшення товщини теплопередаючої стінки і підвищення її теплопровідності, а також запобігання відкладень забруднення на стінці є очевидними методами інтенсифікації теплообміну.

Література

1. Ратушняк, Г. С. Дзеджула В.В., *Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2008, 117 с.
2. Ратушняк Г. С., В. В. Дзеджула, *Енергозбереження в системах біоконверсії*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2006. – 87 с.
3. Горшенин А. С. *Методы интенсификации теплообмена*. Самара, Россия: Самар.гос.техн.ун-т, 2009, 82 с.
4. Белозерцев В.Н. и др. *Интенсификация теплообмена*. Самара, Россия: Самарский университет, 2018, 208 с.
5. Куріс Ю. В., Червоний І. Ф., *Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти*. Запоріжжя, Україна: ЗДІА, 2010, 489 с.
6. Жукаускас А. А., Калинин Э. К., Ред., *Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи 2*. Вильнюс, Литва: Моклас, 1988, 189 с.
7. Тихонравов В.С., *Ресурсосберегающие биотехнологии производства альтернативных видов топлива в животноводстве*. М: Росинформротех, 2011, 52 с.
8. Семененко И. В. *Проектирование биогазовых установок*. Украина, Сумы: "Мрия-1", 1996, 347 ст.
9. А.Г. Веденев, Т.А. Веденева, *Руководство по биогазовым технологиям*. Бишкек, Кыргызстан: «ДЭМИ», 2011, 84 ст.
10. Семененко И.В., Зинченко М.Г. *Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов*–Украина, Харьков: НТУ «ХПИ», 2012, 272 ст.
11. Financial support of industrial enterprise's innovative directions of energy saving : Monograph [Electronic resource] / I. Yu. Yepifanova, V. V. Dzhezdzula. Vinnytsia: VNTU, 2022. 138 p.

References

1. Ratuszniak, H. S. Dzhezdzula V.V., *Intensyfikatsiia biokonversii kolyvalnym peremishuvanniam substratu*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM, 2008, 117 s.
2. Ratuszniak H. S., V. V. Dzhezdzula, *Enerhozberezhennia v systemakh biokonversii*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM, 2006. – 87 s.
3. Horshenyn A. S. *Metody yntensyfikatsyy teploobmena*. Samara, Rossyia: Samar.hos.tekhn.un-t, 2009, 82 s.
4. Belozertsev V.N. y dr. *Yntensyfikatsiya teploobmena*. Samara, Rossyia: Samarskyi unyversytet, 2018, 208 s.
5. Kuris Yu. V., Chervonyi I. F., *Biohazovi tekhnolohii. Enerhetychni ta ekolohichni aspekty*. Zaporizhzhia, Ukraina: ZDIA, 2010, 489 s.
6. Zhukauskas A. A., Kalynyn Э. К., Red., *Yntensyfikatsiya teploobmena. Uspekhy teploperedachy 2*. Vylnius, Lytva: Mokslas, 1988, 189 s.
7. Tykhonravov V.S., *Resursosberehaiushchye byotekhnolohyy proyzvodstva alternatyvnykh vydiv toplyva v zhyvotnovodstve*. M: Rosynformahrotekh, 2011, 52 s.
8. Semenenko Y. V. *Proektyrovanye byohazovyykh ustanovok*. Ukrayna, Sumy: "Mryia-1", 1996, 347 st.
9. A.H. Vedenev, T.A. Vedeneva, *Rukovodstvo po byohazovym tekhnolohiyam*. Byshkek, Kyrgyzstan: «ДЭМУ», 2011, 84 st.
10. Semenenko Y.V., Zynchenko M.H. *Oborudovanye y protsessy metanovoho sbrazhyvaniya orhanycheskykh otkhodov*– Ukrayna, Kharkov : NTU «KhPY», 2012, 272 st.
11. Financial support of industrial enterprises innovative directions of energy saving : Monograph [Electronic resource] / I. Yu. Yepifanova, V. V. Dzhezdzula. Vinnytsia: VNTU, 2022. 138 p.

ШАМУРАТОВ О. Ю.

Національний університет "Львівська Політехніка"

<https://orcid.org/0000-0003-1913-5362>e-mail: oleksii.y.shamuratov@lpnu.ua

МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ НА ОСНОВІ ВИБОРУ ОЗНАК

У статті описується розробка методу, що дозволяє створювати кластери на основі вибору ознак. У сучасному світі індустрія розваг в Інтернеті швидко розвивається, створюючи попит на більш якісні продукти. Це в свою чергу призвело до використання штучного інтелекту не тільки в науці, а й у розвагах. На даний момент набирають популярності програми, що дозволяють створювати анімацію об'єктів на фотографіях. У цій статті представлений підхід до вирішення проблеми визначення об'єктів для анімації

Ключові слова: кластеризація, вибір ознак, анімація

Oleksiy SHAMURATOV

Lviv Polytechnic National University

OBJECT CLUSTERIZATION METHOD IN PICTURES BASED ON FEATURE SELECTION

The article describes the development of a method that allows you to create clusters based on selecting feature features. In today's world, the entertainment industry on the Internet is developing rapidly, creating a demand for better products. This factor has led to the use of artificial intelligence not only in science but also in entertainment. Currently, applications that allow you to create animations of objects in photos are gaining popularity. This article presents an approach to solving the problem of defining objects for animation. To classify and further identify objects, their characteristics should be determined. This is one of the options for abstraction, in which the input set of properties of the object is reduced to the minimum required number of features by which you can identify the object.

The algorithm can be used to determine the main features of objects, such as area and perimeter, radii of inscribed and circumscribed circles, sides of the described rectangle, number and relative position of angles, gradient of the object histogram. Based on these features clustering and classification of the image are implemented. The artificial neural network was trained on image samples, each class contained from 2528 to 16185 images of 64x64 pixels. 1000 images of objects of each class were then selected for testing. The success of recognition based on a convolutional neural network was evaluated. According to the results, we can conclude that the smaller the invariance of the class, the greater the accuracy of recognition. The amount of data in the training sample has little effect on the accuracy of the algorithm. After calculating the intensity gradient, you should divide the image into a cell and build a histogram of the gradient object for each pocket of cell; the histogram module corresponds to the intensity gradient at the point.

Keywords: clustering, feature selection, animation

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасному світі індустрія розваг в Інтернеті швидко розвивається, створюючи попит на більш якісні продукти. Це в свою чергу призвело до використання штучного інтелекту не тільки в науці, а й у розвагах. На даний момент набирають популярності програми, що дозволяють створювати анімацію об'єктів на фотографіях. У цій статті представлений підхід до вирішення проблеми визначення об'єктів для анімації.

Аналіз досліджень та публікацій

Для класифікації та подальшої ідентифікації об'єктів необхідно спочатку визначити їх ознаки. Це один з варіантів абстракції, при якому вхідний набір властивостей об'єкта зводиться до мінімально необхідної кількості ознак, за якими можна буде ідентифікувати об'єкт. Вибір ознак починається з набору вхідних даних, який поділяється на первинний і вторинний. Передбачається, що первинні ознаки мають бути інформативними і не повинні бути зайвими [1]. Такий підхід сприяє прискоренню процесу навчання алгоритмам розпізнавання об'єктів та більш точної їх роботи. При аналізі складних об'єктів однією з головних проблем є кількість змінних. Цей підхід споживає більше обчислювальних ресурсів, а також може спричинити колізію щодо вибірки навчальних даних, що призведе до зниження точності розпізнавання. Ізоляція ознак є основним методом побудови комбінацій змінних, щоб уникнути цих проблем, але цього достатньо, щоб точно описати об'єкт. Правильно оптимізований розподіл функцій є ключем до побудови ефективної моделі [2].

Після визначення ознак об'єкта необхідно буде кластеризувати і класифікувати дані, передавати об'єкти в екземпляр. Зразок означає назву місцевості в просторі знаків, на який відображено багато предметів або явищ матеріального світу. Ознака — це кількісний опис властивості предмета чи явища [3]. Простір ознак — це N-вимірний простір, визначений для даної задачі розпізнавання, де N — фіксована кількість вимірних ознак для будь-якого об'єкта. Вектор із простору ознак x , що відповідає об'єкту завдання розпізнавання, є N-вимірним вектором з компонентами (x_1, x_2, \dots, x_N) , які є значеннями ознак для цього об'єкта. Іншими словами, розпізнавання образів можна визначити як віднесення вихідних даних до певного класу шляхом вибору істотних ознак або властивостей, що характеризують ці дані, із загальної маси несуттєвих деталей [4].

Проаналізувавши загальну інформацію про класифікацію, можна описати формальне завдання класифікації. Дано багато об'єктів. Їх потрібно класифікувати. Множина представлена підмножинами, які називаються класами. Вказано: відомості про класи, опис усього набору та опис інформації про об'єкт, належність якого до певного класу невідома. На основі наявної інформації про класи та опису об'єкта необхідно визначити, до якого класу належить цей об'єкт [5].

Проблема кластеризації схожа на проблему класифікації, але відмінність між методом полягає в тому, що класи не визначені. Кластеризація не робить ніяких статистичних висновків, але дає можливість проаналізувати структуру даних, тобто мету кластеризації. йде пошук подібних конструкцій.

Штучні нейронні мережі є одним з найбільш ефективних і поширених способів представлення та вирішення проблем розпізнавання зображень. Нейронні мережі дуже добре працюють у задачах розпізнавання образів, оскільки поєднують математичні та логічні обчислення. Нейронна мережа дозволяє обробляти велику кількість факторів, незалежно від їх походження, це стабільний універсальний алгоритм. Нейронні мережі дозволяють будувати залежності параметрів у вигляді полінома на основі навчальної вибірки, що дуже спрощує реалізацію розпізнавання об'єктів [6].

Виклад основного матеріалу

Щоб знайти об'єкт у зображенні, база даних об'єктів повинна існувати. Наповнення бази планується за рахунок користувачів системи, які будуть відбирати об'єкти для подальшої анімації. Для таких об'єктів система повинна вибрати ознаки, класифікувати об'єкт і зберегти його в базі даних. База даних класифікованих об'єктів у майбутньому використовуватиметься для пошуку схожих об'єктів на зображенні та дозволить користувачеві автоматично вибрати об'єкти для подальшої анімації.

Тому визначення об'єкта на зображенні має бути стійким до повороту об'єкта, масштабу зображення та різноманітності ракурсів зображення. Вибираються такі ознаки об'єкта:

- Визначення площі та периметра;
- Визначення радіусів вписаного та описаного кіл;
- Означення сторін описаного прямокутника;
- Визначення кількості та взаємного розташування кутів;
- Побудова гістограми градієнтів об'єктів.

Стандартна формула для розрахунку площі об'єкта розраховується шляхом підрахунку кількості елементів, пов'язаних з об'єктом. У разі надходження зображень до системи площа може бути розрахована за кількістю пікселів у області зображення.

$$S = \sum_x \sum_y \begin{cases} 1, A(x, y) \in O \\ 0, A(x, y) \notin O \end{cases}$$

де O — множина масиву пікселів $A(x, y)$, що належать об'єкту [7].

Щоб знайти периметр об'єкта P , достатньо порахувати кількість пікселів, що належать контуру об'єкта. Для забезпечення інваріантності до масштабу об'єкта додається нормований знак U .

$$U = \frac{A}{P^2}.$$

Визначення радіусів вписаного та описаного кіл. Спочатку потрібно визначити геометричний центр об'єкта.

$$C_{(x,y)} = \left(\frac{\sum_x \sum_y x A(x,y)}{\sum_x \sum_y A(x,y)}, \frac{\sum_x \sum_y y A(x,y)}{\sum_x \sum_y A(x,y)} \right),$$

де x і y — номери рядків і стовпців усіх пікселів $A(x,y)$, що належать об'єкту.

На цьому етапі можна визначити радіуси вписаного та описаного кіл. Це робиться шляхом вибору мінімальної та максимальної довжини вектора, який починається в центрі зображення і закінчується в точках всередині периметра.

$$R_{max} = \max_{0 \leq i \leq N} \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2},$$

$$R_{min} = \min_{0 \leq i \leq N} \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2},$$

де x_c і y_c — координати центру, N — кількість пікселів по периметру, $(x_i, y_i) \in P$ [8]. Нормований параметр R додається до формули.

$$R' = \frac{R_{max}}{R_{min}}.$$

Визначення сторін описаного прямокутника. Визначте максимальне та мінімальне значення абсцис та ординат зображення об'єкта x_{max} і x_{min} , y_{max} і y_{min} , а потім визначте висоту H і довжину L прямокутника:

$$L = \max_{0 \leq i \leq N} x_i - \min_{0 \leq i \leq N} x_i;$$

$$H = \max_{0 \leq i \leq N} y_i - \min_{0 \leq i \leq N} y_i,$$

де N — кількість пікселів по периметру, а $(x_i, y_i) \in P$ [9].

Визначення кількості та взаємного розташування кутів. Для цього оцініть відстань l між початковою і кінцевою точками фрагмента контуру.

$$l_i = x_i |x_{i-2} - x_{i+2}| + |y_{i-2} - y_{i+2}|.$$

Потім перевіряється умова $1 \leq i \leq N$, де N — умовне порогове значення. Вам потрібно буде реалізувати його визначення на основі минулих властивостей об'єкта. Якщо умова виконується, то точка належить до множини кутових точок [10].

Побудова гістограми градієнта об'єкта. Основною ідеєю є припущення, що зовнішній вигляд і форму об'єктів в області цифрового зображення можна описати розподілом градієнтів інтенсивності. Розраховується напрямок градієнта кожного пікселя. Для двовимірної функції $f(x,y)$ вектор градієнта має такий вигляд:

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right].$$

Часткові похідні функцій інтенсивності в координатах x і y є оцінками контрасту в напрямку відповідних осей координат [11]. В якості точної оцінки контрасту в напрямку відповідної осі координат можна усереднювати три різні оцінки контрасту навколо пікселя формул:

$$\begin{aligned} \nabla_x &= \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{1}{3} \left(\frac{f[x+1,y]-f[x-1,y]}{2} + \frac{f[x+1,y-1]-f[x-1,y-1]}{2} + \frac{f[x+1,y+1]-f[x-1,y+1]}{2} \right), \\ \nabla_y &= \frac{\partial f}{\partial y} \approx \frac{1}{3} \left(\frac{f[x,y+1]-f[x,y-1]}{2} + \frac{f[x-1,y+1]-f[x-1,y-1]}{2} + \frac{f[x+1,y+1]-f[x+1,y-1]}{2} \right). \end{aligned}$$

Для оцінки даних дотримуйтесь мінімізації зображення маски оператора контрасту об'єкта. Для зниження обчислювальної складності найкраще використовувати диференціально-вимірну маску [11].

Після підрахунку градієнта інтенсивності слід розділити зображення на комірку та побудувати гістограму об'єкта градієнтів для кожного кишені осередку G модуль гістограми відповідає градієнту інтенсивності в точці.

$$G = \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}.$$

Потім проводять згладжування гістограм у клітинках, щоб забезпечити інваріантність відносно зміни гніву та контрасту.

Виділення ознак об'єкта. Щоб знайти подібність між об'єктами, будемо обчислювати семантичну відстань між ознаками.

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{ik} - X_{jk})^2},$$

де D_{ij} - евклідова відстань між точками i і j , які характеризують одну ознаку різних об'єктів. N - найменша кількість значень, що враховуються для ознаки між двома об'єктами, k - порядковий номер значення ознаки.

Процедура визначення кількості кластерів складається з наступних кроків:

1. Запускається алгоритм k -середніх для K кластерів і відповідна внутрішня дисперсія $\delta_k = \sum_{i=1}^N \sum_{x \in c_i} \|x - m_i\|^2$. x - вектор, що характеризує об'єкт, що входить до кластера c_i , загальна відстань між об'єктами та центром кластера. Параметр m_i є центром поточного кластера. Для різних значень K будується множина δ_k .

2. Вибір ступеня перетворення $Y = \frac{p}{2}$.

3. Обчисліть стрибки за формулою $J_k = \delta_k^{-Y} - \delta_{k-1}^{-Y}$.

4. Для остаточної кількості кластерів виберіть значення, що дорівнює максимальному [12].

• Розпізнавання об'єктів. Архітектура згорткової нейронної мережі була обрана для пошуку об'єктів на зображенні з наступних причин:

- зображення мають великий розмір;
- велика кількість параметрів і класів об'єктів;
- незмінність до зміни масштабу зображення, кутів зйомки камери та інших геометричних спотворень вхідного сигналу [13].

Структура нейронної мережі:

• Вхідний шар. Буде містити вхідне значення пікселів зображення, розмірність шару $[64 \times 64 \times 3]$.

• Згортковий шар. Розмір фільтра $7 \times 7 \times 3$. Аналіз буде виконано на 5 об'єктах, тому шар складатиметься з 5 площин з розмірами $[62 \times 62 \times 1]$.

• Шар підшару. Розмір маски 2×2 . Він складається з 5 площин розміром $[31 \times 31 \times 1]$.

• Вихідний шар. Розмір $[1 \times 1 \times N]$, де N - кількість кластерів у базі даних.

В якості функції активації обрано гіперболічний тангенс:

$$f(a) = A \cdot \tanh(S_a),$$

де $f(a)$ - значення шуканого елемента, a - зважена сума сигналів попереднього шару, A - амплітуда цієї функції, S - її положення відносно опорної точки [14].

Ця функція має ряд переваг для вирішення проблеми:

- симетричні функції активації, такі як гіперболічний тангенс, забезпечують швидшу конвергенцію, ніж стандартна логістична функція;
- функція має неперервну першу похідну;
- функція має просту похідну, яку можна обчислити через її значущість, що забезпечує меншу обчислювальну складність.

Результати

Для перевірки класифікації було використано 5 різних класів об'єктів. Зразки взяті з відкритого доступу проекту TensorFlow [15]. Штучна нейронна мережа була навчена на зразках зображень, кожен клас містив від 2528 до 16185 зображень розміром 64x64 пікселі. Потім для тестування було відібрано 1000 зображень об'єктів кожного класу. Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Результат класифікації та розпізнавання об'єктів

Назва класу	Кількість об'єктів у навчальній вибірці	Середній відсоток успішного визнання
Автомобілі	16185	83%
Квіти	3670	68%
Яблука	2528	85%
Листя	6732	71%
Коти	12361	85%

Отже, найнижчий результат був у класі «Квіти» через те, що навчальна вибірка була невеликою, а зображення об'єктів були квітами більш ніж одного виду. У вибірці класу «Автомобілі» були також автомобілі різних марок і типів кабін, але через велику кількість зображень у вибірці підсумковий результат тесту був вищим. Найвищий результат отримано для класу «Яблука». Це пояснюється тим, що зразок містив об'єкт, структура та форма якого мало відрізнялися.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі представлено алгоритм, за допомогою якого можна визначити основні ознаки об'єктів, такі як площа та периметр, радіуси вписаного та описаного кіл, сторони описаного прямокутника, кількість та взаємне розташування кутів, градієнт гістограми об'єкта. На основі цих ознак проводити кластеризацію та класифікацію зображення. Оцінювалась успішність розпізнавання на основі згорткової нейронної мережі. За результатами можна зробити висновок, що чим менше інваріантність класу, тим більша точність розпізнавання. Кількість даних у навчальній вибірці мало впливає на точність алгоритму.

Література

1. Tien D. B., Ching Y. S., Zi-Cai L., Yuan Y. T., "Computer Transformation of Digital Images and Patterns", p. 276, 1989.
2. Y.-Q. Wang, "An Analysis of Viola-Jones Face Detection Algorithm", IPOL Journal, 2013.
3. Khan H. Abdullah, M. Shamian Bin Zainal, «Efficient eyes and mouth detection algorithm using combination of viola jones and skin color pixel detection» International Journal of Engineering and Applied Sciences, № Vol. 3 № 4, 2013.
4. V. Gaede и O. Gunther, "Multidimensional Access Methods", ACM Computing Surveys, pp. 170-231, 1998.
5. S. Khan, H. Rahmani, Syed Afaq Ali Shah, M. Bennamoun, G. Medioni, S. Medioni, "A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision", Morgan & Claypool, p. 207, 2018.
6. Sibte ul Hussain, "Machine Learning Methods for Visual Object Detection". p. 160, 2012.
7. P. Arabie, L. J. Hubert, G. De Soete, "Clustering and Classification", p. 500, 1996.
8. D. Parks, "Object Detection and Analysis: A Coherency Filtering Approach", p. 172, 2008.
9. Yongqiang Z., Chen Y., Seong G. K., Quan P., Yongmei C., "Multi-band Polarization Imaging and Applications" 1st ed., p. 204, 2016.
10. Manikandan S., "Vision Based Assistive System for Label and Object Detection", p. 64, 2015.
11. Salma H., "Object Detection Using Histogram Of Gradients", p. 52, 2018.
12. Wu J., "Advances in K-means Clustering: A Data Mining Thinking", Springer Science & Business Media, p. 180, 2021.
13. J.Loy, "Neural Network Projects with Python: The ultimate guide to using Python to explore the true power of neural networks through six projects", Packt Publishing, p. 308, 2019.
14. Brannon W. C., "Object Detection in Low-spatial-resolution Aerial Imagery Using Convolutional Neural Networks", p. 79, 2019.
15. Dataset <https://knowyourdata-tfds.withgoogle.com>

References

1. Tien D. B., Ching Y. S., Zi-Cai L., Yuan Y. T., "Computer Transformation of Digital Images and Patterns", p. 276, 1989.
2. Y.-Q. Wang, "An Analysis of Viola-Jones Face Detection Algorithm", IPOL Journal, 2013.
3. Khan H. Abdullah, M. Shamian Bin Zainal, «Efficient eyes and mouth detection algorithm using combination of viola jones and skin color pixel detection» International Journal of Engineering and Applied Sciences, № Vol. 3 № 4, 2013.
4. V. Gaede и O. Gunther, "Multidimensional Access Methods", ACM Computing Surveys, pp. 170-231, 1998.
5. S. Khan, H. Rahmani, Syed Afaq Ali Shah, M. Bennamoun, G. Medioni, S. Medioni, "A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision", Morgan & Claypool, p. 207, 2018.

-
6. Sibt ul Hussain, "Machine Learning Methods for Visual Object Detection". p. 160, 2012.
 7. P. Arabie, L. J. Hubert, G. De Soete, "Clustering and Classification", p. 500, 1996.
 8. D. Parks, "Object Detection and Analysis: A Coherency Filtering Approach", p. 172, 2008.
 9. Yongqiang Z., Chen Y., Seong G. K., Quan P., Yongmei C., "Multi-band Polarization Imaging and Applications" 1st ed., p. 204, 2016.
 10. Manikandan S., "Vision Based Assistive System for Label and Object Detection", p. 64, 2015.
 11. Salma H., "Object Detection Using Histogram Of Gradients", p. 52, 2018.
 12. Wu J., "Advances in K-means Clustering: A Data Mining Thinking", Springer Science & Business Media, p. 180, 2021.
 13. J.Loy, "Neural Network Projects with Python: The ultimate guide to using Python to explore the true power of neural networks through six projects", Packt Publishing, p. 308, 2019.
 14. Brannon W. C., "Object Detection in Low-spatial-resolution Aerial Imagery Using Convolutional Neural Networks", p. 79, 2019.
 15. Dataset <https://knowyourdata-tfds.withgoogle.com>

МЕЛЬНИК А. М.

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7799-9877>e-mail: melnyk.andriy@gmail.com

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНОГО ТА ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ

В роботі обґрунтовано використання онтологічного підходу, як ефективного інструмент управління процесами побудови математичних моделей на основі інтервальних даних та використання цих моделей для прикладних задач. Використання онтологічної моделі дало можливість формалізувати процес отримання, зберігання та використання знань, які отримано в процесі математичного моделювання. У статті також представлено особливості побудови архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу. Описано технологію створення програмного забезпечення на основі розробленої онтологічної надбудови для математичного моделювання з використанням інтервальних даних для різних об'єктів, а також різних форм реалізації інтерфейсу користувача. Наведено ряд діаграм, які ілюструють особливості використання онтологічного підходу на основі інтервальних даних та описано особливості його інтерпретації в прикладних сферах, зокрема, в задачах екологічного моніторингу.

Ключові слова: архітектура програмного забезпечення, математичне моделювання, інтервальний аналіз, онтологічний підхід.

Andriy MELNYK
West Ukrainian National University

SOFTWARE ARCHITECTURE FOR MATHEMATICAL MODELING BASED ON INTERVAL AND ONTOLOGICAL APPROACH

Mathematical knowledge is a term often used to describe various components of mathematical science, such as theorems, lemmas, axioms, proofs, etc.. By the term "knowledge from mathematical modeling" we understand the definition of a huge amount of knowledge, which is formalized both within the framework of a specific mathematical model and in the process of its construction, as well as related procedures of practical use. Compared to other forms of knowledge, such as rules, solution trees, mathematical knowledge is more abstract and more structured.

In general, the ontological approach to mathematical modeling refers to the use of ontology, as it is based on the terms of mathematical modeling and descriptions of relationships between the main processes of its course.. The general ontological approach to mathematical modeling from an applied point of view does not allow to manage the processes of building mathematical models, because it can only be used to describe the area of mathematical modeling.

From an applied point of view, most basic forms of mathematical knowledge are either embedded in specific software tools, such as models of aggregate operation in simulation software, or must be formally interpreted into a more general mathematical tool, following appropriate syntactic rules. Most of this type of knowledge relates to specific modeling tasks and is clearly implemented with the help of appropriate procedural descriptions, rather than declarative representations, unlike the philosophical vision of mathematical modeling.

The paper substantiates the use of the ontological approach as an effective tool for managing the processes of building mathematical models based on interval data and using these models for applied problems. The use of the ontological model made it possible to formalize the process of obtaining, storing and using knowledge obtained in the process of mathematical modeling. The article also presents the features of building a software architecture for mathematical modeling based on interval analysis and an ontological approach. The technology for creating software based on the developed ontological add-on for mathematical modeling using interval data for various objects, as well as various forms of user interface implementation, is described. A number of diagrams illustrating the peculiarities of using the ontological approach based on interval data are presented and the peculiarities of its interpretation in applied fields, in particular, in the tasks of environmental monitoring, are described.

Keywords: software architecture, mathematical modeling, interval analysis, ontological approach..

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Математичні знання - це термін, який часто використовується для опису різних складових математичної науки, таких як теореми, леми, аксіоми, доведення тощо [1]. Під терміном «знання з математичного моделювання» розуміємо означення величезної кількості знань, які формалізовані як в рамках конкретної математичної моделі, так і в процесі її побудови, а також пов'язані з ними процедури практичного використання. Порівняно з іншими формами знань, такими як правила, дерева розв'язків, математичні знання є більш абстрактними та більш структурованими [2,3,4].

В загальному випадку онтологічний підхід до математичного моделювання стосується використанням онтології, оскільки він будується на термінах математичного моделювання та описах взаємозв'язків між основними процесами його перебігу [4,5]. Загальний онтологічний підхід до математичного моделювання з прикладної точки зору не дозволяє здійснювати управління процесами побудови математичних моделей, оскільки за його допомогою можна лише описати область математичного моделювання.

Виходячи з прикладної точки зору, то більшість основних форм математичних знань або вбудовані у конкретних програмних засобах, таких як моделі роботи агрегату в імітаційному програмному забезпеченні, або мають бути формально інтерпретовані у більш загальний математичний інструмент, дотримуючись відповідних синтаксичних правил. Більшість такого типу знань стосується конкретних завдань моделювання і чітко реалізовані за допомогою відповідних процедурних описів, а не декларативних представлень на відміну від філософського бачення математичного моделювання [5].

Разом з тим застосування відомого інструментарію реалізованих програмних засобів недостатньо як для дослідників так і спеціалістів-практиків, оскільки сама онтологія процесу прихована в процедурах, модулях конкретного програмного продукту. Така функціональна специфіка суттєво звужує можливості практичного використання такого інструментарію дослідниками та практиками [6].

Виходячи із наведених вище припущень виникає актуальна науково-практична задача побудови та реалізації онтологічних моделей для конкретного розділу математичного моделювання, його окремих підходів. Застосування такого типу онтологічних моделей дозволить значно розширити можливості використання існуючого інструментарію.

Одним із напрямків математичного моделювання є індуктивний підхід, який ґрунтується на самоорганізованому процесі еволюційного переходу від первинних даних до явних математичних моделей, що відображають ті закономірності функціонування модельованих об'єктів і систем, які неявно містяться в наявних експериментальних, дослідних, статистичних даних [7-9].

Важливою особливістю при реалізації індуктивного підходу є природа невизначеності інформаційних масивів даних, оскільки він ґрунтується на методах аналізу самих даних. В ряді робіт [10] наведено онтологічний підхід для побудови математичних моделей в межах індуктивного підходу на основі методів групового урахування аргументів. В рамках запропонованого підходу визначено ключові параметри для основних складових процесу моделювання, які обумовлюють можливість узагальнення та доцільність конструювання багатофункціональних програмних модулів при розробці комп'ютерних засобів індуктивного моделювання на основі МГУА [8,10]. Оскільки запропонований підхід має складну структуру, яка інтерпретована з використанням Protege [11,12] та не містить прикладних програмно-інтерпретованих рішень, то його практичне використання в інших підходах до математичного моделювання є не достатньо доцільним. Використання такого підходу вимагає великих часових витрат на формалізацію самої предметної області та виходячи із складності її представлення в рамках системи Protege не сприятиме підтримці серед розробників відповідних прикладних програмних рішень [12].

Іншим напрямком в математичному моделюванні на основі індуктивного підходу є методи математичного моделювання на основі інтервальних даних [13-15]. Особливість цих методів полягає в множинному представленні оцінок параметрів моделі «вхід-вихід», побудованої за результатами експерименту, в якому вихідні змінні отримані у інтервальному вигляді [16].

В результаті застосування методів інтервального аналізу, замість однієї моделі «вхід-вихід», отримують коридор (множину) рівнозначних інтервальних моделей статичної системи. Властивості отриманих моделей залежать від обраного методу множинного оцінювання параметрів. Переважно множини оцінок параметрів шукають у вигляді многогранника, багатовимірного еліпсоїда чи прямокутного паралелепіпеда, який задає інтервали значень параметрів [16].

Враховуючи, що методи моделювання систем, побудовані на аналізі інтервальних даних, вимагають мінімальної кількості інформації про досліджувану систему, їх застосування суттєво розширює клас досліджуваних систем [15,16].

Разом з тим, ці методи для використання як дослідниками так і користувачами-практиками є значно обмеженим через відсутність розробленого онтологічного опису для даного напрямку математичного моделювання, який давав би можливості розширення сфери застосування існуючих інтервальних моделей для конкретної предметної галузі так і для розробки нових моделей. Прикладом в цьому випадку може слугувати сфера побудови математичних моделей для медицини чи екологічного моніторингу, зокрема опис математичних моделей на основі інтервальних даних для процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту [16]. Багаторічний досвід авторів цієї праці у створенні та застосуванні такого типу моделей показав, що у випадку зміни стану середовища, чи умов отримання інтервальних даних, більшість побудованих інтервальних моделей втрачають точність, або стають взагалі неадекватними. Застосування онтологічної «надбудови» до процесу розробки та використання моделей суттєво розширює можливості моделювання характеристик згаданих систем та підвищує точність моделі у конкретних випадках. Простіше кажучи, онтологічна модель, як «надбудова» може використовувати функції «перемикача» для обрання найкращої моделі зі репозиторію, залежно від зміни умов середовища моделювання.

Потреба в автоматизованому, систематичному, багаторазовому використанні математичних моделей, як середовища отримання, накопичення та багаторазового використання знань цілком виправдана в контексті великої кількості інформації про процес та продукцію знань, що генеруються та зберігаються.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: проектування та програмна реалізація архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу.

Виклад основного матеріалу

У запропонованому в роботі [17] онтологічному підході для представлення понять, методів та засобів математичного моделювання на основі інтервальних даних, а саме декларативної та процедурної частин, математичні знання відокремлені. Декларативна частина складається з інформації, яка необхідна для побудови моделі, інформації, отриманої з моделі та відповідних математичних виразів, що представляють модель. Процедурна частина складається з деталізованих частин моделі, відповідних методів та алгоритмів їх реалізації, процедур ініціалізації змінних та їх інтерпретації. Серед інструментів, які використовують для побудови та використання онтології, найчастіше використовуються Protege та OntoStudio [12]. Ці засоби завдяки надійності, високій частоті використання, масштабованості та розширюваності можуть також використовуватися в процесі побудови відповідних онтологічних моделей для представлення та управління знаннями, які накопичують в процесі математичного моделювання [1,17]. Проте, зазначені засоби складно інтегрувати в програмно-апаратні комплекси, які, зокрема часто використовують в медицині, і де швидкість та якість прийняття управлінських рішень є першочерговим завданням. Тому в якості інструментарію для побудови онтології в даній роботі використовуються:

- засоби сучасних реляційних баз даних - для зберігання інформації;
- алгебра кортежів - для формалізованого представлення знань та подальшої їх програмної інтерпретації незалежно від вибраних програмних платформ для їх реалізації, а також з метою реалізації ефективних методів управління накопиченими знаннями;
- Python та Java в якості мов програмування для відповідної інтерпретації запропонованих методів та засобів.

Процедурна частина онтологічного підходу складається з механізму побудови на основі методів аналізу даних відношень, які аналізують рівняння в онтологічній інтерпретації математичних моделей та переводять їх у вирази, які можна інтерпретувати в інші зовнішні програмні середовища. Загальна схема такого підходу представлена на рисунку 1.

Підсистема управління процесами вибору моделей створює оператори для ініціалізації параметрів моделі з відповідними значеннями, створює асоціації між змінними індексами та величини, для яких він позначається, ініціалізує універсальні константи, збирає фактичні команди розв'язку моделі та знаходить відповідний розв'язок множини рівнянь. Такий програмно-інтерпретований онтологічний під надає нам багато корисних функцій, включаючи можливість символічної обробки, яка безпосередньо обробляє рівняння у різних форматах та розширюється можливістю сучасних мов програмування, таких як Java.

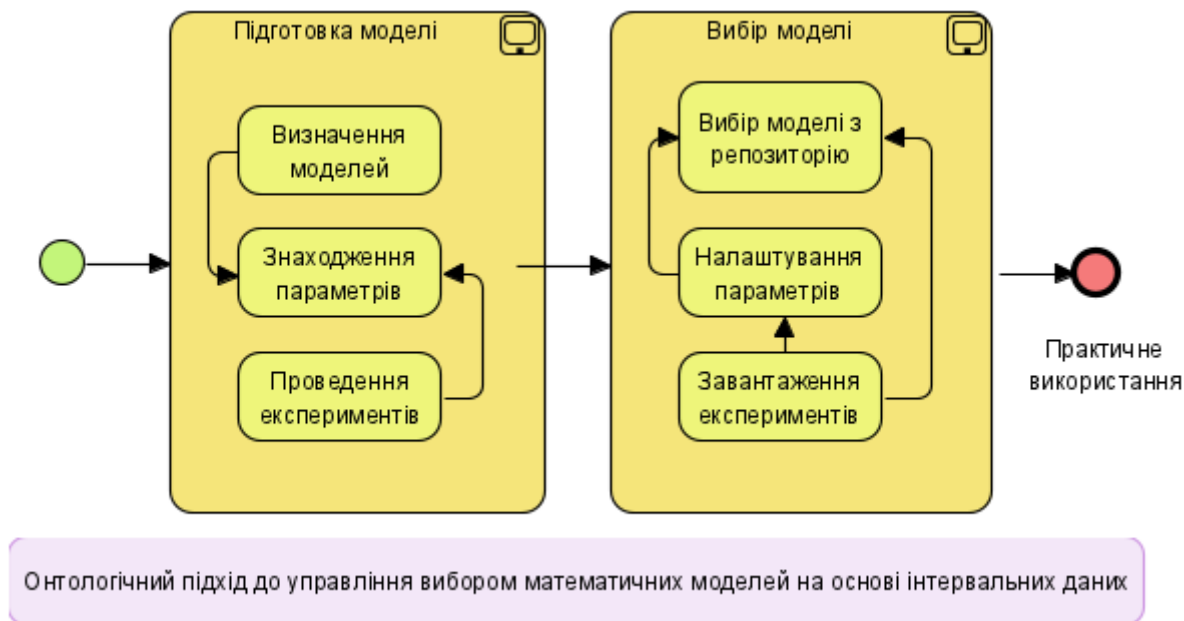


Рис. 1. Схема імплементації онтологічного підходу для математичного моделювання на основі інтервальних даних для практичного використання

Графічний інтерфейс користувача використовується для відображення результатів розв'язування (графіків або виразів) разом із збереженням повертається до онтології використання математичних моделей, а також використовується для вибору найкращого екземпляра моделі, яку необхідно розв'язати і яка найкраще підійде до використання в тій чи іншій практичній ситуації. Також можна змодельовати перебіг виконання тих чи інших операцій, що досить зручно для прийняття відповідних рішень.

На рисунку 2 представлено загальну діаграму використання програмної системи для моделювання на основі методів інтервального аналізу та онтологічного підходу. Основними користувачами системи є дослідник, адміністратор та користувач, які можуть виконувати визначений набір функцій, які представлено на рисунку.

Проблемою застосування онтологічного підходу є складність використання побудованої інтервальної моделі у випадку інших умов середовища. Наприклад, у праці [16] розглянуто застосування зазначеного методу для побудови моделі поширення забруднень шкідливих викидів автотранспорту із використанням моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів NO₂ (діоксид азоту) на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича, м. Тернопіль. Результати експериментів показали, що побудована у праці модель динаміки концентрацій діоксиду азоту не є універсальною, тобто не може бути використана для моделювання в інших точках міста, а бо за інших погодних умов. Це пов'язано із неврахуванням дії різних в тому числі і випадкових чинників, які є характерними для конкретної точки у якій здійснюється моделювання. До такого виду чинників відносять: природна вентиляція; наявність вертикальних та горизонтальних потоків повітря тощо.

Таким чином, для підвищення прогностичних властивостей моделей пропонуємо модифікувати вищеописаний підхід із використанням нелінійного елементу в моделі, який виконує функцію перемикача для обрання адекватної моделі, в залежності від умов її застосування. На рисунку 3 представлено схему взаємодії між зовнішніми інформаційними системами, середовищем моделювання, інформаційним репозиторієм та онтологічно-керованою підсистемою.

В інформаційному репозиторію зберігається база напрацьованих математичних моделей, яка включає такі основні компоненти: формалізовані математичні моделі (рівняння, функції, параметри, константи); графічна інтерпретація результатів моделювання (графіки, таблиці, різноманітні схеми); результати проведення експериментальних досліджень (опис предметної області, характеристики перебігу експериментів, результати застосування моделей).

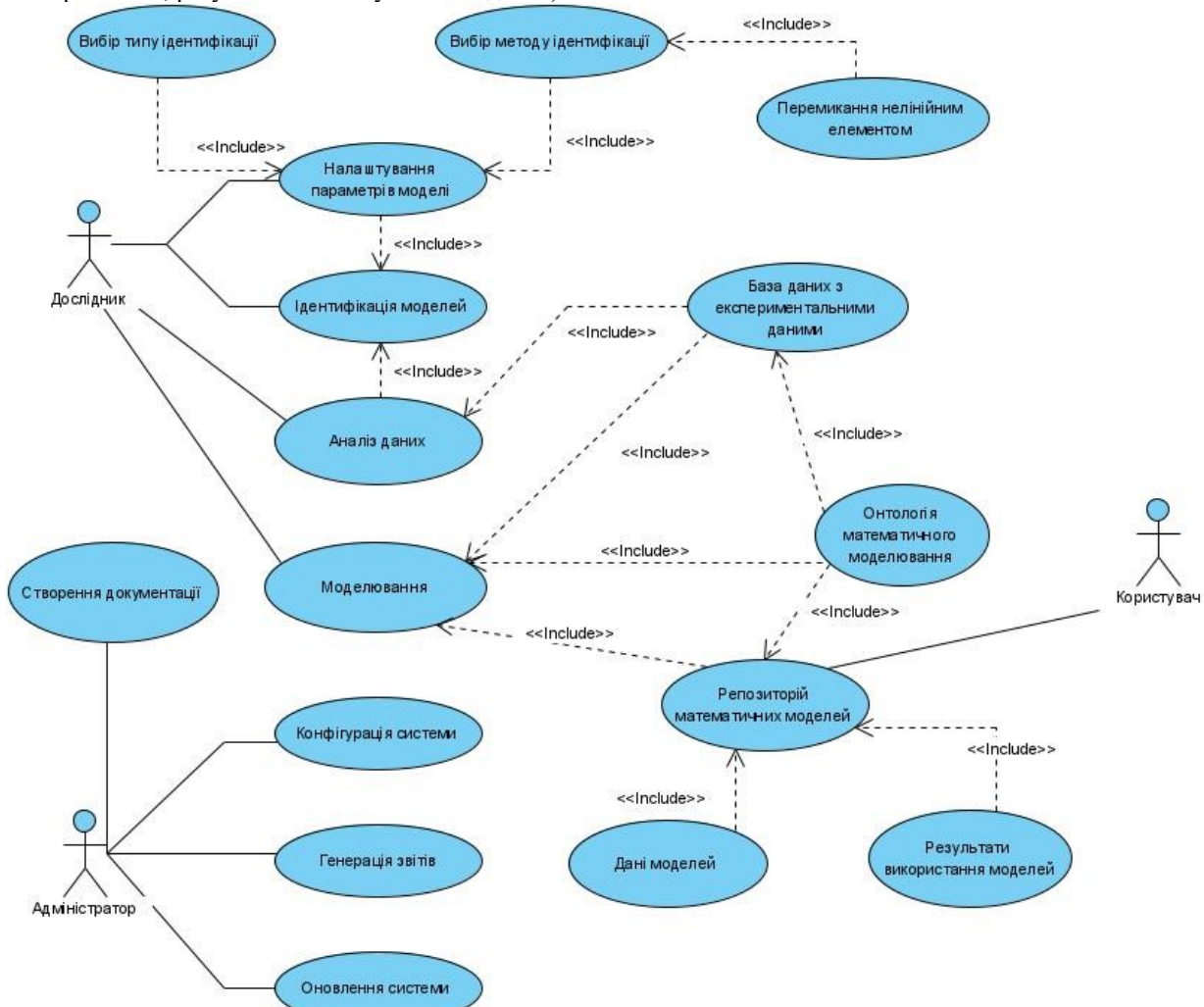


Рис. 2. Діаграма варіантів використання системи для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу

Програмна онтологічно-керована система SmartOntologyModeller містить реалізацію декларативної та операційної онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу, а також включає підсистему взаємодії із зовнішніми інформаційними системами та підсистему комунікації з інформаційними репозиторієм з метою повторного використання математичних моделей та побудову нових.

Модель взаємодії програмних підсистем слугує для отримання інформації про принципи взаємодії, які виникають в процесі операції побудови та використання математичних моделей. Сюди відносять

інформацію про протоколи взаємодії, структуру пакетів для обміну даними та правила управління відповідним обміном.

Важливим елементом у цьому підході є онтологічна модель предметної області, яка враховує різні умови застосування інтервальних моделей. Розглянемо цей підхід детальніше. Онтологічно-керована система інтерпретує знання, які отримані в процесі використання інтервальних математичних моделей. Ці знання можна розділити на декларативну та процедурну частини. Декларативна частина складається з інформації, яка необхідна для реалізації розв'язку моделі, інформації отриманої з моделі та відповідні рівняння моделі. Процедурна частина складається з деталізованих особливостей моделі, відповідних використовуваних методів та алгоритмів пошуку розв'язків, ініціалізації змінних та їх відповідна інтерпретація.

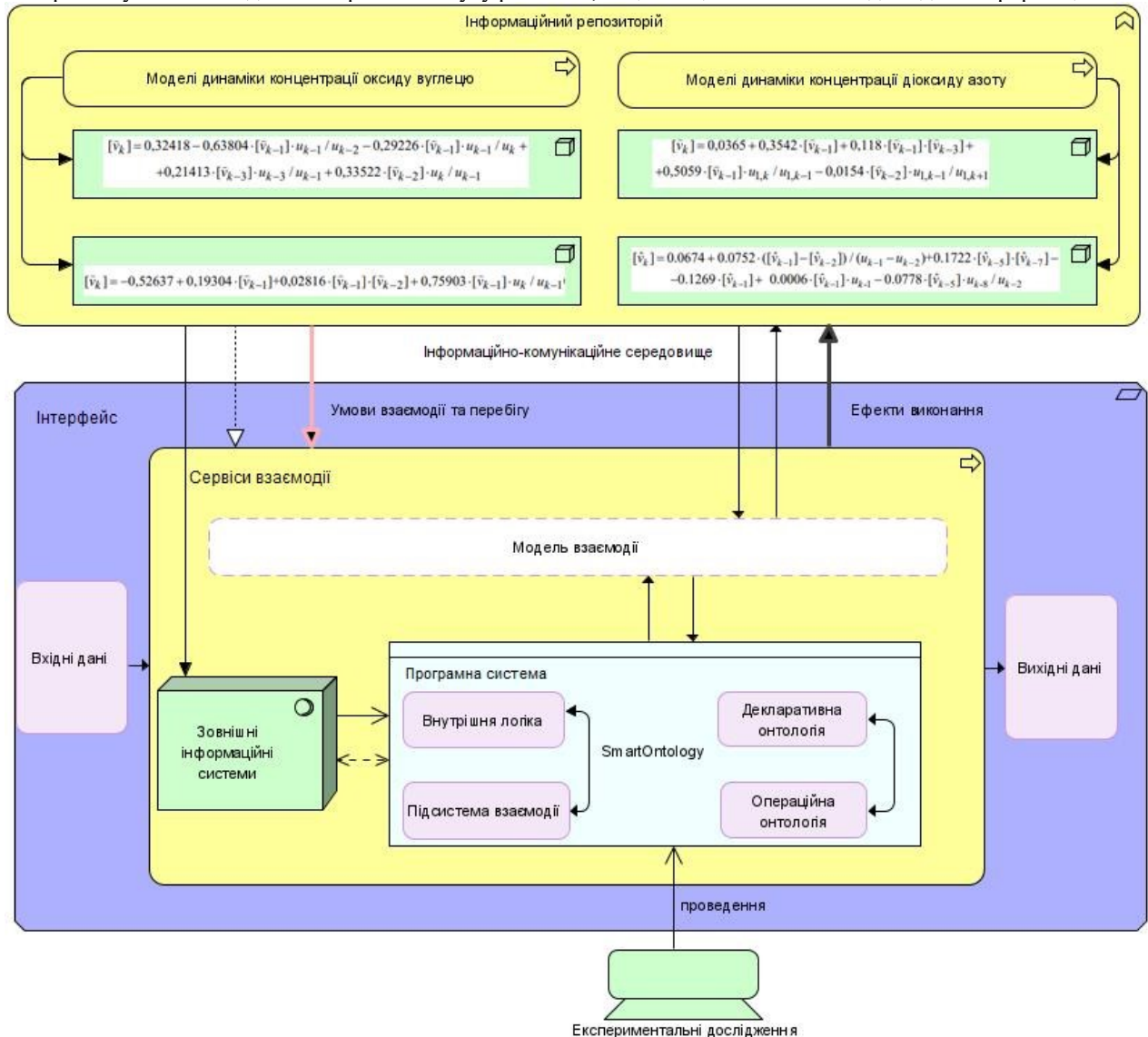


Рис. 3. Схема реалізації взаємодії онтологічно-керованої системи із зовнішніми інформаційними системами та відповідним інформаційним репозиторієм

Онтологічний підхід, забезпечує побудову моделі представлення предметної області, та слугує своєрідним нелінійним елементом інтервальної дискретної моделі, побудованої на основі аналізу інтервальних даних для розширення сфери застосування простіших моделей у певній предметній області.

Як зазначалося вище, для підвищення прогностичних властивостей моделей із забезпечення адекватності та достатньої для прийняття рішень точності поряд із методами управління вибором моделей із інформаційного репозиторію, пропонується модифікувати онтологічний підхід із використанням нелінійного елемента в моделі. Такий елемент слугуватиме засобом перемикавання в процесі вибору адекватної математичної моделі в залежності від умов її застосування.

Процес виділення нелінійного елемента повинен знаходитися в домені основних його характеристик та характеристик математичної моделі. До основних характеристик самого нелінійного елемента необхідно віднести:

- формуючі параметри, які можуть містити як вхідні, так і вихідні дані. Ці параметри можна отримувати як і з інформаційного репозиторію, так і в процесі взаємодії із зовнішніми інформаційними системами;

- гіпотези, які описують основні варіанти використання вибраного нелінійного параметра, а також інші специфічні припущення;
- об'єкти, які дозволяють виділити основні властивості досліджуваних характеристик та сформулювати основні цілі його впливу;
- дії, які визначають можливий набір операцій використання елемента;
- платформа, яка характеризує набір програмного забезпечення, яке можна використовувати в процесі імплементації математичної моделі;
- предметна область, яка характеризує сукупність пов'язаних між собою функцій, засобів управління, що розглядається в межах певного контексту;

До основних характеристик математичної моделі на основі інтервального підходу, які б корелювали з характеристиками виділеного нелінійного елемента необхідно віднести наступні:

- функції, які поряд із реалізацією виконання загально прийнятих математичних обчислень включають реалізацію основних процесів опису математичної моделі. Ту також необхідно враховувати ступінь осмислення та розуміння функцій, які враховуються на етапі вибору можливих варіантів використання.
- використання, яке дозволяє описати та оцінити основні особливості, які стосуються певної предметної області та зовнішніх інформаційних систем, в тому числі і зовнішніх середовищ моделювання;
- технічні характеристики, які включають кількісні (похибка, ймовірність) та якісні (точність, адекватність, складність) оцінки моделей в процесі їх побудови та практичного використання;

Дуже важливим етапом виокремлення нелінійного елемента інтервальної дискретної моделі є процес його узгодження, як окремого об'єкта з притаманними йому характеристиками та самої математичної моделі, яка має власну множину відповідних характеристик.

Такий процес можна формалізувати на основі відповідних формальних описів онтологічної моделі предметної області та онтологічного підходу для моделювання на основі інтервальних даних. Правила та оператори узгодженості згаданих характеристик можна описати на основі операцій класичної алгебри кортежів.

Іншою особливістю пропонованого підходу є те, що компоненти створеної таким чином моделі є повністю і повторно використовуваними, тобто рівняння, змінні, припущення з однієї моделі можуть бути використані повторно під час створення іншої моделі, або сформована база математичних моделей може бути повторно використана в процесі інтерпретації в інших інформаційних системах.

Підсистема управління перемиканням нелінійним параметром в процесі вибору математичних моделей ініціалізує оператори для формування параметрів моделі з відповідними значеннями, створює асоціації між змінними, формує фактичні команди побудови моделі та відповідний розв'язок множини рівнянь.

Також можна змоделювати перебіг виконання тих чи інших операцій, що досить зручно для прийняття відповідних рішень. Таким чином, вдається поєднати методи та засоби побудови дискретних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних.

Експериментальні дослідження

Практична реалізація онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних призводить до формування спільних структурних елементів, виходячи із специфіки їх використання для специфічних предметних областей. В роботі здійснено практичну реалізацію програмного забезпечення, як один із варіантів використання напрацьованої бази модельних експериментів у різних предметних галузях в рамках пропоновано онтологічного підходу.

Онтологічний підхід дозволив здійснити побудову моделей представлення предметної області, а запропонована схема вибору нелінійного елемента інтервальної дискретної моделі, побудованої на основі аналізу інтервальних даних дозволив розширити сферу застосування простіших моделей у обраній предметній області.

В роботі було проведено ряд експериментальних досліджень, які стосувалися програмної реалізації методу перемикання нелінійним елементом математичної моделі в залежності від зміни умов перебігу чи факторів проведення експериментів. Система реалізована з використанням мови програмування Java, підключення Python інструментарію та реляційної бази дани MySQL.

Користувач вибирає екземпляр моделі та відповідний операційний приклад. Для вибраної моделі здійснюється виокремлення нелінійного елемента, який на основі правил узгодженості дозволяє будувати відповідні оператори з використанням відповідним бібліотек, які інтерпретують рівняння з формалізованих, проіндексованих частин, ініціалізувати відповідні параметри моделі, засновані на відповідному екземплярі операції, і, нарешті, дозволяють обрати відповідну модель для побудови необхідного розв'язку або здійснити уточнення та побудову нової моделі.

Отримані результати можна інтерпретувати у відповідному графічному інтерфейсі (графіки, таблиці, схеми, набір результуючих файлів), а також відображаються інші результати, які зберігаються назад в операційному екземплярі математичної моделі з відповідними уточненнями та розміщуються в інформаційному репозиторію з присвоєнням окремого ідентифікатора. Таке уточнення дозволить в майбутньому правильно обирати моделі в залежності від специфіки вибраних чи зміни істотних умов використання у відповідній предметній області.

Розглянемо приклад застосування онтологічного підходу для побудови інтервальної дискретної динамічної моделі для моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів концентрацій діоксиду азоту на одному із перехресть з насиченим рухом автотранспорту в м. Тернопіль.

В інформаційному репозиторії для вказаного об'єкта дослідження знайдено декілька інтервальних математичних моделей. На рисунку 4 наведено формальне представлення вибраної моделі в середовищі SmartOntologyModeller.

The screenshot shows the SmartOntologyModeller interface. On the left is a sidebar with 'Basic Tools' including Move, Slider, Extremum, and Best Fit Line. The main area displays a mathematical model for NO2 concentration dynamics:

$$[\hat{v}_k] = 0,0365 + 0,3542 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0,118 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-3}] + 0,5059 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{1,k} / u_{1,k-1} - 0,0154 \cdot [\hat{v}_{k-2}] \cdot u_{1,k-1} / u_{1,k+1} F$$

Below the equation is a green button 'Вибрати модель' (Select model). To the right, there are two checked checkboxes: 'інтервал прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту' and 'інтервал вимірюваних значень концентрацій діоксиду азоту'. A green button 'УМОВИ' (Conditions) is also visible.

Рис. 4. Вибір інтервальної математичної моделі для моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів концентрацій діоксиду азоту в середовищі SmartOntologyModeller

Наведена на рисунку 4 модель показує взаємозв'язок між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспорту для різних точок міста. У результаті проведеного аналізу вибірки даних для розглянутого прикладу, вдалося з'ясувати причину неможливості побудови єдиної моделі для дослідження динаміки концентрацій діоксиду азоту на перехрестях внаслідок забруднень автотранспортом, а саме – через неоднозначність зв'язку між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспорту для різних точок міста. Як витікає з проведеного аналізу, для усунення цієї проблеми необхідно здійснювати управління вибраним структурним елементом моделі.

На рисунку 5 представлено процедуру вибору нелінійного елемента інтервальної дискретної динамічної моделі та відповідне перемикання на інший екземпляр моделі.

The screenshot shows the SmartOntologyModeller interface with a more complex view. It includes a sidebar with 'Basic Tools' and 'Edit' options. The main area displays the same mathematical model as in Figure 4, but with additional elements:

- A graph showing 'concentration, mg / m3' over 'Time' with a blue line and a dashed line.
- A table titled 'Результати' (Results) showing measured concentrations of NO2 and traffic intensity.
- A graph titled 'Перемикання' (Switching) showing a transition between two model instances.

The 'Результати' table is as follows:

№	Time	Measured concentrations of NO2, mg / m3		Traffic intensity, units
		Zk-	Zk+	
1	0:20	0,0336	0,045458	168
2	0:40	0,023263	0,031474	152
3	1:00	0,017822	0,024112	147
4	1:20	0,010728	0,014514	76
5	1:40	0,010074	0,01363	73
6	2:00	0,011038	0,014934	59
7	2:20	0,010648	0,014406	48
8	2:40	0,008484	0,011478	43
9	3:00	0,007548	0,010213	41
10	3:20	0,005784	0,007825	37
11	3:40	0,008973	0,012139	38

Рис. 5. Результати вибору нелінійного елемента дискретної динамічної моделі та відповідне перемикання на інший екземпляр математичної моделі в середовищі SmartOntologyModeller

Таким чином, отримані результати в межах онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних дозволяють представляти предметну область, у вигляді комплексного нелінійного елемента інтервальної дискретної моделі, побудованої на основі аналізу інтервальних даних для розширення сфери застосування простіших моделей у обраній предметній області.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Незважаючи на сучасний прогрес у більшості сфер використання та управління процесом математичного моделювання, управління знаннями у цій галузі є дуже перспективним напрямком наукових та практично-орієнтованих досліджень.

В рамках цієї роботи запропоновано архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу. Онтологічний підхід програмно імплементовано до формалізації як самих математичних моделей на основі інтервальних даних, так і формалізації особливостей їх використання. Такий підхід дозволяє значно спростити процес створення математичної моделі, маніпулювання, повторного використання та апробації у реалізованому програмному середовищі, так і спростує процес синхронізації у відповідних зовнішніх програмно-інтерпретованих середовищах.

Література

1. Rittle-Johnson, Bethany. (2017). Developing Mathematics Knowledge. Child Development Perspectives. 11. 10.1111/cdep.12229.
2. Gorgorió, Núria & Albarracín, Lluís & Ärleback, Jonas & Laine, Anu & Newton, Richard & Villarreal, Aitor. (2017). Fundamental Mathematical Knowledge: progressing its specification.
3. Heather C. Hill, Merrie L. Blunk, Charalambos Y. Charalambous, Jennifer M. Lewis, Geoffrey C. Phelps, Laurie Sleep & Deborah Loewenberg Ball (2008) Mathematical Knowledge for Teaching and the Mathematical Quality of Instruction: An Exploratory Study, COGNITION AND INSTRUCTION, 26:4, 430-511, DOI: 10.1080/07370000802177235
4. Suresh, P., G. Joglekar, Shuo-Huan Hsu, P. Akkisetty, Leaelaf Hailemariam, Ankur Jain, G. Reklaitis and V. Venkatasubramanian. "Onto MODEL: Ontological mathematical modeling knowledge management." Computer-aided chemical engineering 25 (2008): 985-990.
5. Cimiano, P. & Völker, J. (2005). Text2Onto – a Framework for Ontology Learning and Data-driven Change Discovery. In Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems (NLDB'2005), 227-238.
6. Moreno Torres, Benjamí, Christoph Völker, Sarah M. Nagel, Thomas Hanke, and Sabine Kruschwitz. 2021. "An Ontology-Based Approach to Enable Data-Driven Research in the Field of NDT in Civil Engineering" Remote Sensing 13, no. 12: 2426. <https://doi.org/10.3390/rs13122426>
7. Madala H.R., Ivakhnenko A.G. Inductive learning algorithms for complex systems modeling. - London, Tokyo: CRC Press, 1994.
8. О.Г.Івахненко. Індуктивні методи самоорганізації моделей складних систем - Київ: Наук.думка, 1982.
9. Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms/ Edited by S.J.Farlow. - New York, Basel: Marcel Decker Inc., 1984. - 350 p.
10. H. Pidnebesna and V. Stepashko, "Ontology-Based Design of Inductive Modeling Tools," 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2021, pp. 731-734, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548121.
11. Urbiet, Itziar, Marcos Nieto, Mikel García, and Oihana Otaegui. 2021. "Design and Implementation of an Ontology for Semantic Labeling and Testing: Automotive Global Ontology (AGO)" Applied Sciences 11, no. 17: 7782. <https://doi.org/10.3390/app11177782>
12. Debellis, Michael. (2021). A Practical Guide to Building OWL Ontologies Using Protégé 5.5 and Plugins.
13. Дивак, М. П. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних [Текст] : монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2018. – 220 с.
14. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. - Т. : Економ. думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.
15. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Парплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.
16. Dyvak M, Rot A, Pasichnyk R, Tymchyshyn V, Huliiev N, Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability. 2021; 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>
17. Mykola Dyvak, Andriy Melnyk, Artur Rot, Marcin Hernes, Andriy Pukas, "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022

References

1. Rittle-Johnson, Bethany. (2017). Developing Mathematics Knowledge. *Child Development Perspectives*. 11. 10.1111/cdep.12229.
2. Gorgorió, Núria & Albarracín, Lluís & Årlebäck, Jonas & Laine, Anu & Newton, Richard & Villarreal, Aitor. (2017). Fundamental Mathematical Knowledge: progressing its specification.
3. Heather C. Hill , Merrie L. Blunk , Charalambos Y. Charalambous , Jennifer M. Lewis , Geoffrey C. Phelps , Laurie Sleep & Deborah Loewenberg Ball (2008) Mathematical Knowledge for Teaching and the Mathematical Quality of Instruction: An Exploratory Study, *COGNITION AND INSTRUCTION*, 26:4, 430-511, DOI: 10.1080/07370000802177235
4. Suresh, P., G. Joglekar, Shuo-Huan Hsu, P. Akkisetty, Leelaf Hailemariam, Ankur Jain, G. Reklaitis and V. Venkatasubramanian. "Onto MODEL: Ontological mathematical modeling knowledge management." *Computer-aided chemical engineering* 25 (2008): 985-990.
5. Cimiano, P. & Völker, J. (2005). Text2Onto – a Framework for Ontology Learning and Data-driven Change Discovery. In *Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems (NLDB'2005)*, 227-238.
6. Moreno Torres, Benjamí, Christoph Völker, Sarah M. Nagel, Thomas Hanke, and Sabine Kruschwitz. 2021. "An Ontology-Based Approach to Enable Data-Driven Research in the Field of NDT in Civil Engineering" *Remote Sensing* 13, no. 12: 2426. <https://doi.org/10.3390/rs13122426>
7. Madala H.R., Ivakhnenko A.G. *Inductive learning algorithms for complex systems modeling*. - London, Tokyo: CRC Press, 1994.
8. O.H.Ivakhnenko. *Induktyvni metody samoorganizatsii modelei skladnykh system* - Kyiv: Nauk.dumka, 1982.
9. *Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms/ Edited by S.J.Farlow*. - New York, Basel: Marcel Decker Inc., 1984. - 350 p.
10. H. Pidnesna and V. Stepashko, "Ontology-Based Design of Inductive Modeling Tools," 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2021, pp. 731-734, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548121.
11. Urbiet, Itziar, Marcos Nieto, Mikel García, and Oihana Otaegui. 2021. "Design and Implementation of an Ontology for Semantic Labeling and Testing: Automotive Global Ontology (AGO)" *Applied Sciences* 11, no. 17: 7782. <https://doi.org/10.3390/app11177782>
12. Debellis, Michael. (2021). *A Practical Guide to Building OWL Ontologies Using Protégé 5.5 and Plugins*.
13. Dyvak, M. P. *Identifikatsiia dyskretnykh modelei system z rozpodilennykh parametramy na osnovi analizu intervalnykh danykh [Tekst] : monohrafiia / M. P. Dyvak, N. P. Porplytsia, T. M. Dyvak*. – Ternopil: Ekonomichna dumka TNEU, 2018. – 220 s.
14. Dyvak M. P. *Zadachi matematychnoho modeliuvannia statychnykh system z intervalnykh danykh : monohrafiia / M. P. Dyvak*. - T. : Ekonom. dumka TNEU, 2011. - 215 c.
15. Dyvak M. P. *Prykladni zadachi strukturnoi ta parametrychnoi identyfikatsii intervalnykh modelei skladnykh ob'ektiv [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / M. P. Dyvak, A. V. Pukas, N. P. Parplytsia, A. M. Melnyk*. - Ternopil : Universytetska dumka, 2021. - 212 s.
16. Dyvak M, Rot A, Pasichnyk R, Tymchyshyn V, Huliiev N, Maslyiak Y. *Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles*. *Sustainability*. 2021; 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>
17. Mykola Dyvak, Andriy Melnyk, Artur Rot, Marcin Hernes, Andriy Pukas, "Ontology of mathematical modelling based on interval data", *Complexity*, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 17 від 26.05.2022 р.**

Підп. до друку 26.05.2022 р. Ум.друк.арк. 27,38 Обл.-вид.арк. 26,05
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
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