

**Міжнародний науково-технічний
журнал**

**ВИМІРЮВАЛЬНА ТА
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
В ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСАХ**

2021, № 1

**International scientific-technical
journal**

**MEASURING AND COMPUTING
DEVICES IN TECHNOLOGICAL
PROCESSES**

2021, Issue 1

**Хмельницький 2021
Khmelnyskyi 2021**

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Затверджений як фахове видання (перереєстрація), група «Б»
Наказ МОН 28.12.2019 №1643

Засновано в травні 1997 р.

Виходить 2 рази на рік

Хмельницький, 2021, № 1 (67)

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/vott>

Журнал включено до наукометричних баз:

Index Copernicus <http://jml2012.indexcopernicus.com/p24781565,3.html>
h-індекс 49,97
Google Scholar http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN_nusAAAAJ&hl=uk - індекс 9

Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського <http://nbuv.gov.ua/j-tit/vott>

Головний редактор **Мартинюк В. В.**, д. т. н., професор, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій і телекомунікацій Хмельницького національного університету

Заступник головного редактора **Бойко Ю. М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету

Відповідальний секретар **Кравчик Ю. В.**, к. е. н., старший викладач кафедри економіки, менеджменту та адміністрування Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Бармак О. В., д.т.н., **Бедратюк Л. П.**, д.фіз.-мат.н., **Бубулис Алгимантас**, д.т.н. (Литва), **Васілевський О. М.**, д.т.н., **Калачинський Томаш**, PhD (Польща), **Косенков В. Д.**, к.т.н., **Коробко Є. В.**, д.т.н. (Білорусь), **Кулаков П. І.**, д.т.н., **Кухарчук В. В.**, д.т.н., **Кучерук В. Ю.**, д.т.н., **Лампасі Алессандро**, PhD, (Італія), **Лукасевіч Марцін**, PhD, (Польща), **Мрозинський Адам**, PhD, (Польща), **Мусяль Януш**, PhD, (Польща), **Ортіґуейра Мануель Дуарте**, PhD, (Португалія), **Походило Є. В.**, д.т.н., **Психалінос Костас**, PhD, (Греція), **Савенко О. С.**, д.т.н., **Семенко А. І.**, д.т.н., **Сурду М. М.**, д.т.н., **Шарпан О. Б.**, д.т.н.

Технічний редактор Кравчик Ю. В., к. е. н.

**Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 17 від 27.05.2021**

Адреса редакції: Україна, 29016,
м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
Хмельницький національний університет
редакція журналу “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”
067-347-74-57

e-mail: mscientificjournal@gmail.com

web: <http://journals.khnu.km.ua/index.php/MeasComp>

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 23279-13119ПР від 24 травня 2018 року (перереєстрація)

© Хмельницький національний університет, 2021
© Редакція журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 2021

ЗМІСТ

СТАРЧЕНКО Є. О. ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКА 300 МВТ5 E. STARCHENKO RESEARCH OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF 300 MW POWER UNIT	
ВАСИЛЬСВ М. В. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ 11 M. VASYLIEV DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A COMPRESSOR UNIT FOR NATURAL GAS LIAUEFACTION	
ВАСИЛЬЧЕНКО І. П., САЧАНІУК-КАВЕЦЬКА Н. В., БАРАНЕНКО Р. В. ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ ТА ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ 16 I. VASYLCHENKO, N. SACHANIUK-KAVETS'KA, R. BARANENKO DISTRIBUTION SYSTEMS AND PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGIES	
ЯРОЦЬКИЙ М. М. ОГЛЯД СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ ПАРОГЕНЕРАТОРА БЛОКУ ВВЕР-100026 M. YAROTSKYI OVERVIEW OF THE WATER LEVEL CONTROL SYSTEM OF THE VVER-1000 UNIT STEAM GENERATOR	
ГОСТИЩЕВ В. О. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО НАГРІВНОГО КОЛОДЯЗА31 V. GOSTISHCHEV AUTOMATIC SYSTEM OF REGULATION OF A RECUPERATIVE HEATING WELL	
ЯНОВИЦЬКИЙ О. С., ГОРЯЩЕНКО К. Л., ЦЮРПІТА Ю. С., СВАЧІЙ О. І. МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ БАРОМЕТРИЧНОГО ТИСКУ НА БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ38 A. YANOVITSKYI, K. GORIASCHENKO, Y. TSURPITA, O. SVACHII METHOD OF MEASUREMENT OF BAROMETRIC PRESSURE ON UNLANDLESS AIRCRAFT FOR AUTOMATIC HEIGHT DETERMINATION	
ШАГІН В. Ю., НІЧЕПОРУК А.А., КАШТАЛЬЯН А. С. ЦЕНТРАЛІЗОВАНА РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ АТАК У КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ50 V. SHAGIN, A. NICHEPORUK, A. KASHTALIAN CENTRALIZED DISTRIBUTED ATTACK DETECTION SYSTEM IN CORPORATE COMPUTER NETWORKS BASED ON MULTIFRACTAL ANALYSIS	
ПРАВОРСЬКА Н.І., БЕДРАТЮК Л.П., ФОРКУН Ю.В., ЯШИНА О.М. МОВНОНЕЗАЛЕЖНИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ І УСУНЕННЯ ПОВТОРІВ ТА НАДЛИШКОВОСТЕЙ ПРОГРАМНОГО КОДУ56 N. PRAVORSKA, L. BEDRATYUK, Yu. FORKUN, O. YASHYNA LANGUAGE-INDEPENDENT DETECTOR FOR DETECTING AND ELIMINATING REPETITIONS AND EXCESSES OF SOFTWARE CODE	
КРИВИЙ В. М., ЯШИНА О. М., РАДЕЛЬЧУК Г. І., ЛИСЕНКО С.М. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАДИГМ ПРОГРАМУВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ62 V. KRYVYI, O. YASHYNA, G. RADELCHUK, S. LYSENKO COMPARATIVE ANALYSIS OF PROGRAMMING PARADIGMS IN THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE	

ГАРАСИМІВ В. М., ГАРАСИМІВ Т. Г. ВЗАЄМОДІЯ БАЗИ ДАНИХ SCADA-СИСТЕМИ ІЗ ЗОВНІШНІМ ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ	66
V. HARASYMIV, T. HARASYMIV THE SCADA SYSTEM DATABASE INTERACTION WITH EXTERNAL SOFTWARE	
МАРТИНЮК В. В. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ	73
V. MARTYNYUK METHODOLOGY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC RESEARCH IN INFORMATION TECHNOLOGIES	
ІВАНОВ О. В., ЛИЧАК Д. О., НІЧЕПОРУК А. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСИВНОГО СИГМА-ДЕЛЬТА-МОДУЛЯТОРА ДРУГОГО ПОРЯДКУ	77
O. IVANOV, D. LYCHAK, A. NICHEPORUK INVESTIGATION OF SECOND-ORDER PASSIVE SIGMA-DELTA MODULATOR	
КАШУБА А. І., СЕМКІВ І. В., ПЕТРУСЬ Р. Ю., КАШУБА Н. Ю., УКРАЇНЕЦЬ Н. А. ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ АЛЮМІНІЄМ НА КІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ОКСИДУ ЦИНКУ	82
A. KASHUBA, I. SEMKIV, R. PETRUS, N. KASHUBA, N. UKRAINETZ INFLUENCE OF THE ALUMINUM DOPING ON THE KINETIC PROPERTIES OF ZINC OXIDE THIN FILMS	
САФОНІК А. П., ГРИЦЮК І. М., МІЩАНЧУК М. М., ІЛЬКІВ І. В. ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОТРИМАННЯ КОАГУЛЯНТУ НА ОСНОВІ ФОТОКОЛОРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ	97
A. SAFONYK, I. HRYTSIUK, M. MISHCHANCHUK, I. ILKIV INFORMATION SYSTEM OF ELECTROCHEMICAL OBTAINING OF COAGULANT ON THE BASIS OF PHOTOCOLORIMETRIC ANALYSIS	
ОЛІЙНИК Н. Ю., МОКРИЦЬКА Г. М., РОЩІН І. Г. ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СУЧАСНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ	105
N. OLIIANYK, H. MOKRYTSKA, I. ROSHCIN APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN MODERN MANAGEMENT	
КОВТУН І. І., ГОРОШКО А. В., ПЕТРАЩУК С. А. ОЦІНКА МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	113
I. KOVTUN, A. GOROSHKO, S. PETRASHCHUK STRESS AND STIFFNESS ESTIMATION FOR CIRCUIT CARDS ASSEMBLIES UNDER DYNAMIC LOADS	
МАТУС С. К., КВАСНІКОВ В. П. МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОПРИВОДА ДЛЯ МІКРОНАСОСА	121
S. MATUS, V. KVASNIKOV MODELING OF STATIC CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC ACTUATOR FOR A MICROPUMP	
КУЗЬМЕНКО О. В., МИНЕНКО С. В., ГРИЦЕНКО К. Г., ЯЦЕНКО В. В. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ КІБЕРСПОРТИВНОЇ ГАЛУЗІ	126
O. KUZMENKO, S. MYNENKO, K. GRITSENKO, V. YATSENKO APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR STATISTICAL ANALYSIS AND FORECASTING OF THE E-SPORTS INDUSTRY	
ДЖУЛІЙ В. М., ЧЕШУН В. М., ДЖУЛІЙ А. В., ЧОРНЕНЬКИЙ В. І. ІМОВІРНІСНІ АЛГОРИТМИ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ІР-ТЕЛЕФОНІЇ	133
V. DZHULIY, V. CHESHUN, A. DZHULIY, V. CHORNENKIY PROBABILITY ALGORITHMS AND METHODS OF IP-TELEPHONY SECURITY	

УДК 681.5.03

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-67-1-1

СТАРЧЕНКО Є. О.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКА 300 МВт

У статті досліджено вплив різних видів автоматизованих систем регулювання на результати регулювання потужністю енергоблока 300 МВт. Загалом були розглянуті як і різні регулятори, так і різні типи автоматизованих систем регулювання, які би допомогли покращити процес регулювання. Всі наявні автоматизовані системи регулювання були порівняні між собою та встановлено найбільш ефективну з них шляхом проведення дослідження в середовищі Simulink. Було зроблено порівняння між П – регулятором та І – регулятором. Також було зроблене порівняння одно контурної автоматизованої системи керування та комбінованої автоматизованої системи керування. Порівняння були зроблені за рахунок одержання графіків регулювання потужності в середовищі Simulink. Зроблені висновки по необхідності застосування тої чи іншої системи регулювання та який саме регулятор більш коректний на даний момент в даних системах автоматичного керування. Було розглянуто основні принципи регулювання самого енергоблока 300 МВт та видані поради до найбільш кращого та швидшого способу регулювання даного об'єкта. Досліджено основні властивості енергоблока, його вхідні параметри, збурення та вихідні параметри. Побудована за параметричною схемою математична модель яка в подальшому дозволить проводити дослідження по застосуванню різних автоматичних систем регулювання. Розглянуто застосування різних автоматичних систем регулювання на даному об'єкті та зроблені висновки по ефективності застосування різних систем регулювання. Зроблено порівняння між різними видами систем регулювання та винесені висновки по ефективності застосування даних систем регулювання на енергоблок 300 МВт. Виявлені основні переваги та недоліки використаних систем регулювання та вибраний самий ефективний спосіб регулювання а також виявлено найбільш ефективну автоматичну систему регулювання.

Ключові слова: витрата води, витрата палива, автоматизована система регулювання, котлоагрегат, потужність.

E. STARCHENKO

Odessa National Polytechnic University

RESEARCH OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF 300 MW POWER UNIT

Adjusting the power of a 300 MWt unit is one of the most important processes in the power industry, as such units can more quickly transition from one mode of operation to another. That is why a detailed study of the dependence of boiler capacity on both internal and external factors is one of the main priority goals in the energy sector at this time. And a detailed study of the influence of various factors on power is necessary for a more accurate construction of an automated system for regulating the power of a power unit. Because knowing the properties of an object, its response to certain factors or other factors will make it easier to come up with a more optimized automated power control system. And that is why this issue must be taken very seriously, because it will depend on the stability of the boiler and the stability of power changes, depending on the influence of external and internal factors. In this work the emphasis was placed on two parameters. Namely fuel consumption and water consumption.

In this article, the influence of different types of automated control systems on the control results of the power unit capacity of 300 MW was investigated. In general, both different regulators and different types of automated control systems were considered to help improve the control process. All available automated control systems were compared with each other and the most effective of them was established by conducting research in the Simulink environment. A comparison was made between P - regulator and I - regulator. A comparison of a single-loop automated control system and a combined automated control system was also made. The comparisons were made by obtaining power control graphs in the Simulink environment. Conclusions are made on the need to use one or another control system and which regulator is more correct at the moment in these automatic control systems.

Keywords: water consumption, fuel consumption, automatic control system, boiler unit, power.

Постановка проблеми. Проблема в цій статті піднімається наступна: на даний момент у відкритому доступі наразі немає в достатній кількості інформації, яка б дала зрозуміти, які саме регулятори, які саме автоматичні системи керування дають ефективний результат при регулюванні потужністю енергоблока 300 МВт. Саме відсутність детального дослідження у відкритому доступі і є проблемою, яку необхідно виправляти якомога швидше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи усі джерела інформації, на дану тематику, у відкритому доступі є лише невеликі фрагменти які в тій чи іншій мірі описують суть цієї теми, а саме були вивчені матеріали таких авторів: Харабет О.М., Демченко В.А., Волошніченко О.В., Медведєв В.В., Озерова І.П. Хоч дослідження по даній тематиці велись и ведуться, але на даний момент саме у відкритому доступі інформації не вистачає для повної картини, яка б показала наскільки дана тема досліджена. Саме тому, так як саме кафедра комп'ютерних технологій автоматизації спеціалізується на даній тематиці, все необхідні матеріали для дослідження були взяті у викладачів кафедри.

Постановка завдання. Дослідити результати впливу різних автоматичних систем регулювання на потужність енергоблока 300 МВт.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для початку треба нагадати, для чого нам взагалі потрібні енергоблоки 300 МВт: теплова електрична станція (ТЕС) – це сукупність установок, які перетворюють хімічну енергію палива на теплову на електричну. Основне призначення електричних станцій – забезпечення електричною енергією підприємств промислового і сільськогосподарського виробництва, комунального господарства і транспорту.

Теплові електростанції 300МВт поширені і затребувані насамперед через принцип роботи, адже вони працюють при пікових навантаженнях в режимі різко змінних значень потужності. Тому дана робота є актуальною в даний час.

В якості об'єкта для дослідження різних АСР, буде виступати прямоточний котел типу ТГМП-314. Розрахований на спалювання мазуту і природного газу. Призначений для перегріву пари і роботи в блоці з паровою турбіною К-300-240 ЛМЗ потужністю 300 МВт. Котлоагрегат виконаний однокорпусним в П-подібному компонуванні, з винесеними з-під котла РВП, розміщеним поза головним корпусом.

Маючи передавальні функції цього енергоблока які були надані викладачами кафедри комп'ютерних технологій автоматизації, в середовищі Simulink була збудована модель цього об'єкта. Модель в середовищі представлена на рис. 1.

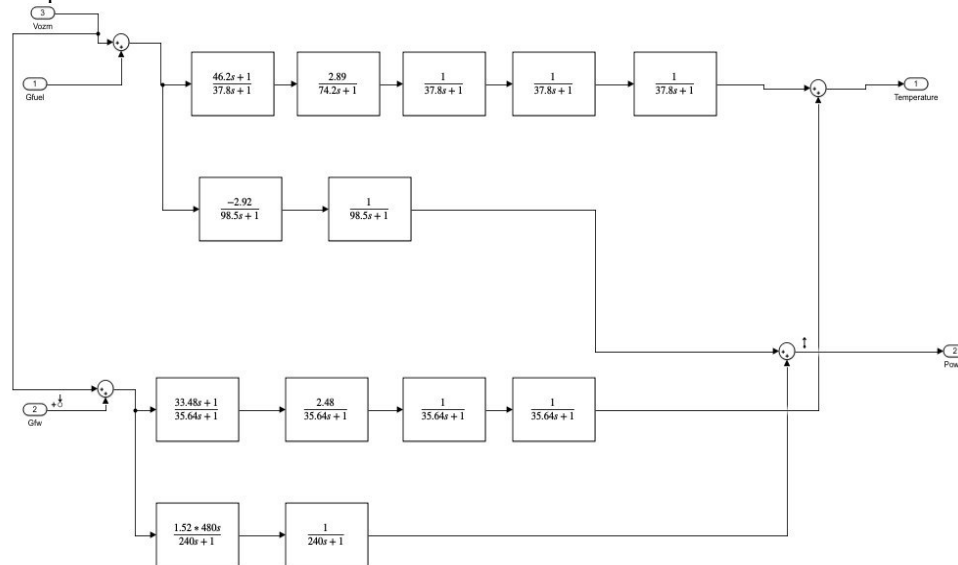


Рис. 1. Модель енергоблока 300 МВт у середовищі Simulink

Джерело: розробка автора

Почнемо з порівнянням П – регулятора та І – регулятора. Результати регулювання зображені на рис. 2 та 3. Слід зазначити, що ми для дослідження використовуємо канал по витраті палива та дивимось, як це впливає на потужність.

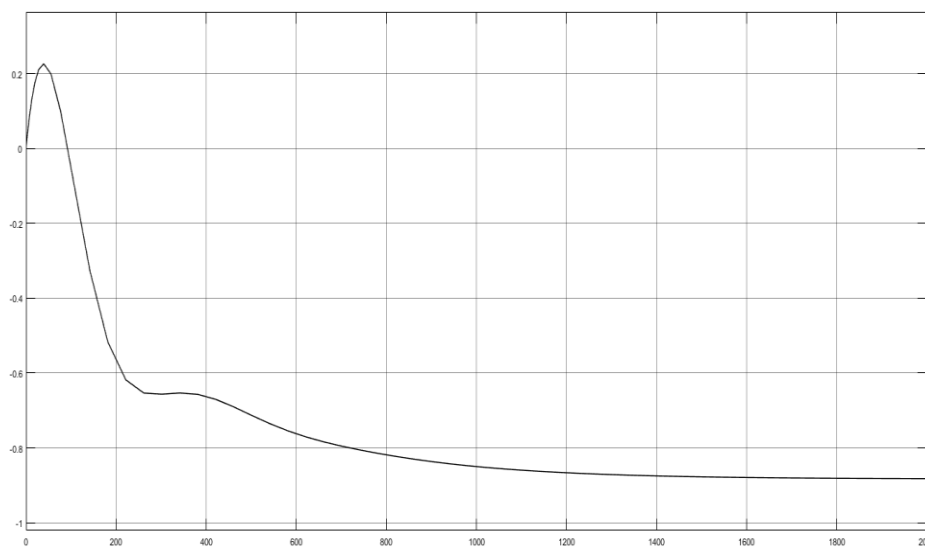


Рис. 2. Графік перехідних процесів регулювання по каналу витраті палива при застосування П-регулятора
Джерело: розробка автора

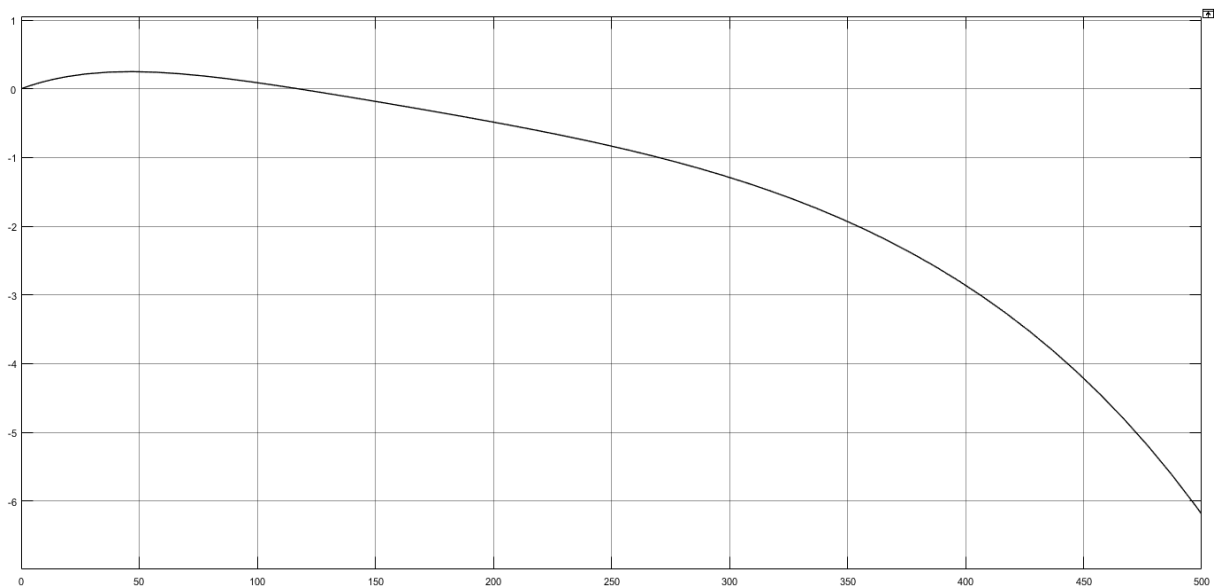


Рис. 3. Графік перехідних процесів регулювання по каналу витраті палива при застосування І-регулятора
Джерело: розробка автора

Як видно з результатів, ні П-регулятор, ні І-регулятор не підходять для регулювання об'єктів даного типу. Дані регулятори взагалі для таких цілей як регулювання, для даного об'єкта є непотрібні так як П-регулятор має велику похибку а І-регулятор взагалі тільки робить об'єкт більш нестабільним.

Для даного дослідження використовувалась одно контурна автоматична система регулювання яка зображена на рис. 4.

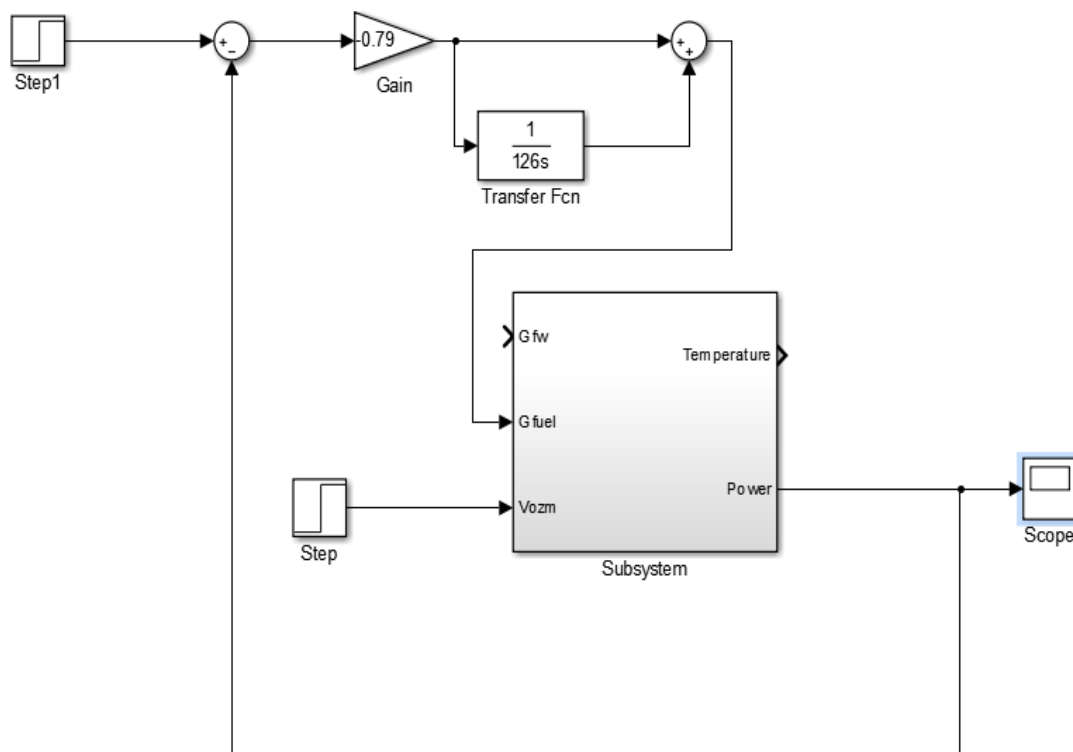


Рис. 4. Одноконтурна АСР потужності енергоблока 300 МВт
Джерело: розробка автора

Також на рис. 4 ми бачимо, що застосовується ПІ-регулятор, який є найбільш ефективним для регулювання потужності. Результати регулювання зображено на рис. 5.

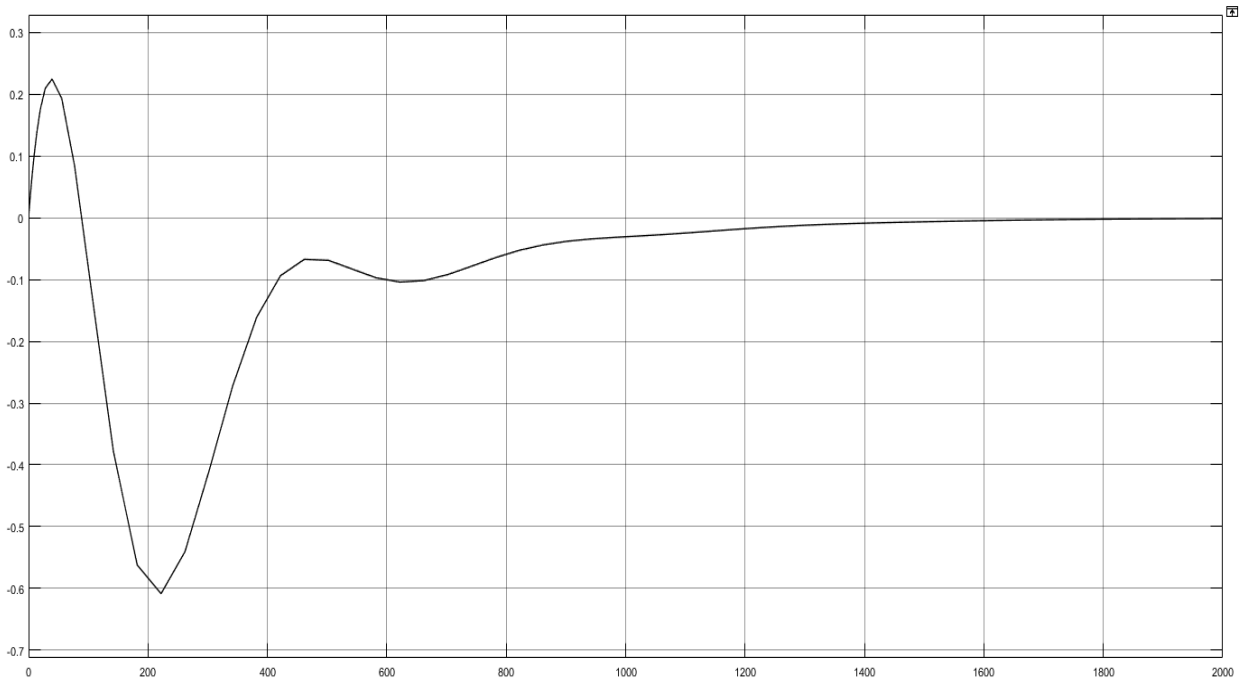


Рис. 5. Графік перехідних процесів регулювання по каналу витраті палива при застосування ПІ-регулятора
Джерело: розробка автора

Саме ПІ-регулятор дає нам найбільш бажаний ефект навіть при використанні одно контурної автоматичної системи регулювання. Тому його надалі і потрібно використовувати для такого складного об'єкта як енергоблок 300 МВт. Адже якість регулювання стоїть на першому місці, від цього залежить, наскільки стабільним буде сам об'єкт. [1, с. 96].

Тепер ми будемо порівнювати одно контурну та комбіновану АСР. Якщо про структуру одно контурної АСР все зрозуміло, то структура комбінованої АСР зображена на рис. 6.

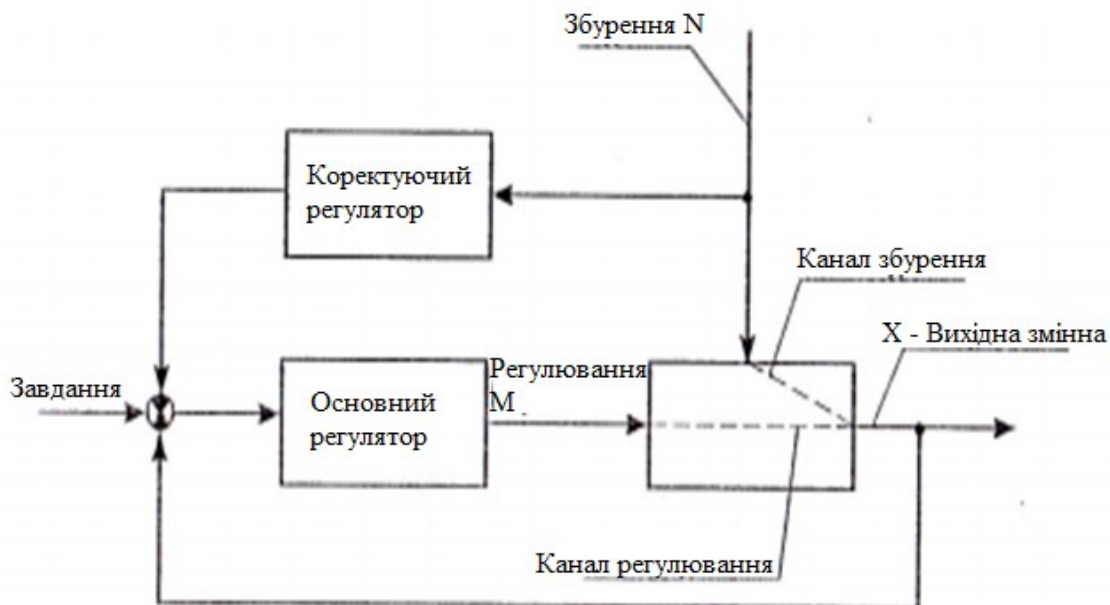


Рис. 6. Структура комбінованої АСР

Джерело: розробка автора

Дана АСР в середовищі Simulink зображена на рис. 7.

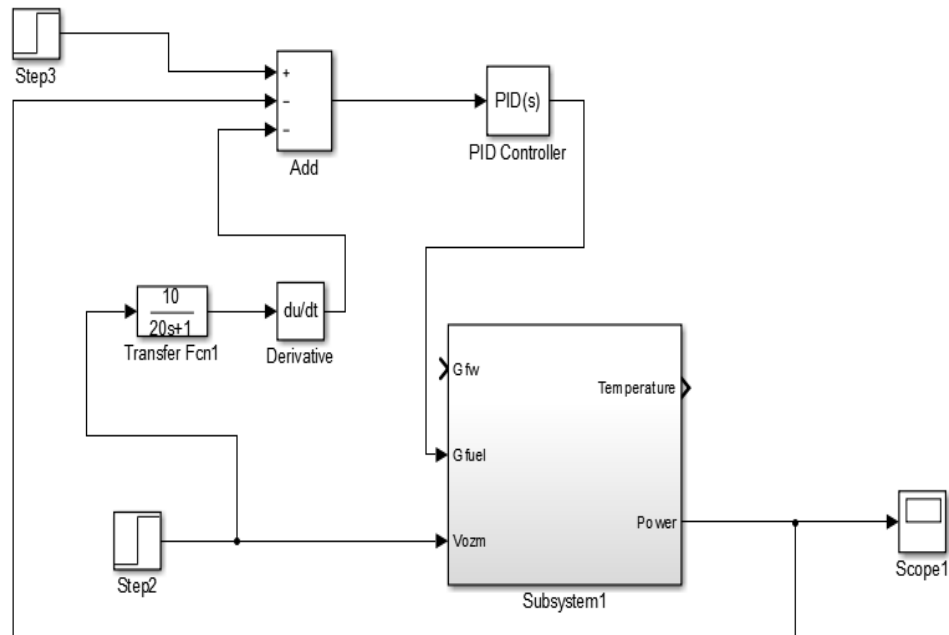


Рис. 7. Комбінована АСР в середовищі Simulink

Джерело: розробка автора

Тепер все таки порівняймо, як же все таки АСР буде більш результативна в даному дослідженні. Результати регулювання одноконтурної та комбінованої АСР зображені на рис. 8.

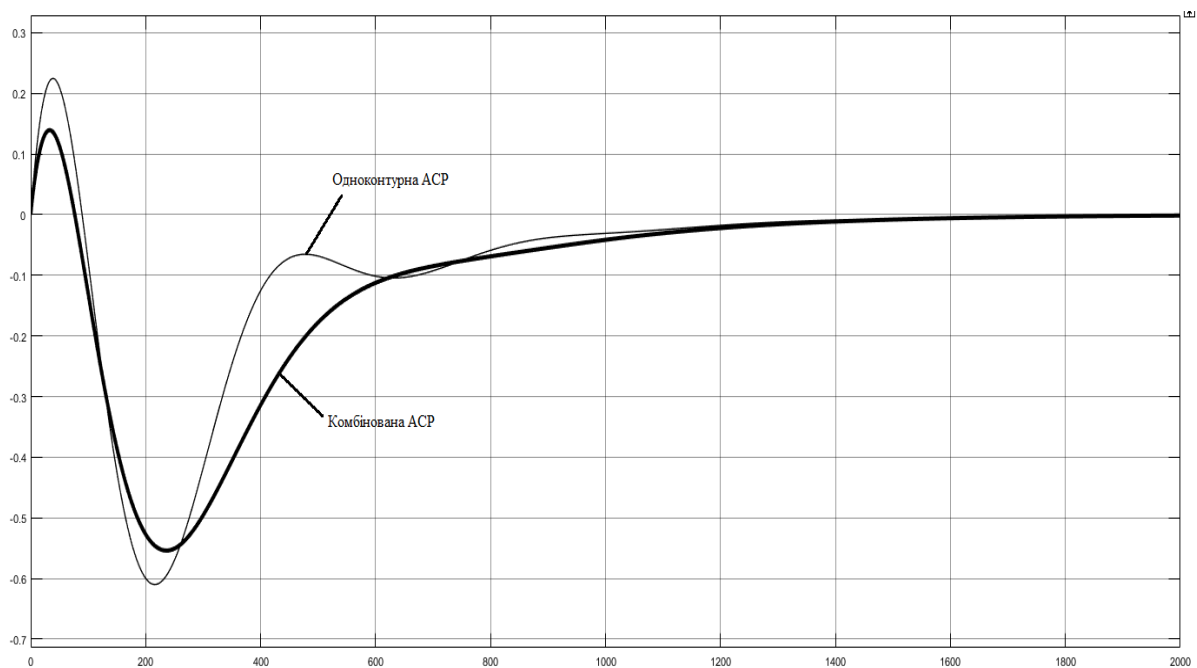


Рис. 8. Результати регулювання комбінованої та одноконтурної АСР в середовищі Simulink

Джерело: розробка автора

Висновки. Дослідивши детально як застосування регуляторів так і застосування автоматичних систем регулювання можна зробити наступні висновки. Для регулювання процесами в енергоблоці 300 МВт, слід використовувати ПІ – регулятор. Це є вже підтвердженим фактом, і даний регулятор працює навіть при застосуванні одно контурної АСР. Але і вибір автоматичної системи регулювання теж має значення і тому як показало дослідження, слід вибрати комбіновану АСР. Дана АСР показала свою ефективність, так як перехідний процес в даній АСР проходить більш стабільно і без коливань в порівнянні з одно контурною АСР.

References

1. Kharabet O.M. Vyvchennia klasychnoi teorii avtomatychnoho upravlinnia. Odesa: Bakhva, 2014. 188 s.
2. Tekhnika chtenya skhem avtomaticheskoho upravleniya y tekhnologicheskoho kontrolya / Pod red. Kliueva A.S. Moskva, 1983. 376 s.
3. Kon L.Y. Metodicheskiye ukazaniya y tablytsy dlia vybora nastroeek PY y P rehuliatorov v odnokonturnykh systemakh rehulyrovaniya teplovykh ob'ektov s zapazdyvaniem. Odessa: OPY, 1972. 30 s.
4. Demchenko V.A. Avtomatychni systemy rehulivannia tekhnologichnymy protsesamy AES i TES. Odesa: ONPU, 1994. 280 s.
5. Voloshnychenko A.V., Medvedev V.V., Ozerova Y.P. Pryntrypyalnye skhemy parovykh kotlov y toplyvopodach. Tomsk: TPU, 2011. 158s.

УДК 681.5.03

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-67-1-2

ВАСИЛЬСВ М. В.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Перш за все, така тема як компресори для зрідження природного газу на превеликий жаль не дуже добре вивчена. І тому, в даній публікації буде представлено детальне дослідження даного об'єкта. Насамперед, перш за все буде розглянуто сам об'єкт, з чого він складається, які його властивості, як в ньому проходять процеси зрідження природного газу. Так спочатку треба повністю вивчити сам об'єкт, а вже потім переходити до побудови його математичної моделі яку в майбутньому можна застосувати для більш детального аналізу, спочатку теоретично а вже потім і в практичних цілях. Це дозволить досягти великих результатів при побудові автоматичної системи керування компресора для зрідження природного газу. Отже буде спочатку вивчений вже сам об'єкт а вже потім на основі отриманих знань ми будемо будувати математичну модель яка в майбутньому знадобиться для розробки автоматичної системи керування. В даній публікації розглядаються загальні положення як про самий об'єкт так і про аспекти керування ним. Перш за все звертається увага на побудові математичної моделі, адже саме вона і є основною метою даного дослідження. Були розроблені параметричні схеми, які вказують на те, які вхідні параметри є у компресорної установки, яке збурення наноситься та які параметри є на виході з цієї компресорної установки. Детально розглянута математична модель в основу якої і була закладена параметрична схема та виведено загальні положення по будові даного об'єкта в іншому середовищі, де можливо більш детально вивчити всі переваги і недоліки компресорної установки для зрідження природного газу. Викладені всі основні формули які були описані для даного об'єкта і які були використані для будівництва математичної моделі. Була побудована математична модель яка відповідає окремо виділеній параметричній схемі і яка повністю відповідає даній параметричній схемі. а основі отриманих математичних формул була створена математична модель яка була перенесена в спеціальне середовище, де вже більш детально можливо дослідити в майбутньому різні схеми регулювання даним об'єктом.

Ключові слова: компресор, зрідження, природний газ, математична модель, зрідження.

M. VASYLIEV

Odessa National Polytechnic University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A COMPRESSOR UNIT FOR NATURAL GAS LIAUEFACTION

First of all, such a topic as compressors for liquefaction of natural gas is unfortunately not very well studied. Therefore, this publication will present a detailed study of this object. First of all, the object itself will be considered, what it consists of, what its properties are, how natural gas liquefaction processes take place in it. So first you need to fully study the object itself, and only then proceed to build its mathematical model, which in the future can be used for more detailed analysis, first theoretically and then for practical purposes. This will achieve great results in the construction of an automatic control system for the compressor for liquefaction of natural gas. So, first the object itself will be studied, and only then, based on the acquired knowledge, we will build a mathematical model that will be needed in the future to develop an automatic control system. Of course, if you do not fully study all the properties of the object, such as the physical processes that take place there and the properties of the compressor. And having already put together all the available information, we can have a complete picture of this object. And from this information that has been collected, we can finally move on to the development of a more detailed mathematical model, which will be, albeit simplified, but still close to reality. Only then, already having this mathematical model, you can move on to a more detailed study in theory. And after conducting theoretical research, it is possible to check all the results of the study on a mathematical model, which will help to understand whether they are effective. Because it is more profitable to check theoretical information on a mathematical model than to do it on a real object. This can be costly, and in the case of an installation such as a natural gas liquefaction compressor, it is very expensive. And therefore this mathematical model will be appropriate. This model can be used in a more detailed study of this object because at the moment there is no holistic picture for the dagono object. It will also be possible to apply this model to find the necessary laws of regulation which will help to increase productivity of the compressor installation for liquefaction of natural gas. And this model will help to solve this question and to establish full-fledged work on studying of the given compressor installation.

Keywords: compressor, liquefaction, natural gas, mathematical model, liquefaction.

Постановка проблеми. На разі проблематика постає наступна: наразі у відкритих джерелах дуже мало інформації на дану тематику, але і сам об'єкт ще не до кінця вивчений, адже в наявності не було виявлено повноцінної математичної моделі компресора для зрідження природного газу. Саме тому для більш детального вивчення необхідно розробити повноцінну математичну модель. Це дозволить насамперед повноцінно дослідити даний об'єкт. Також це дозволить знайти необхідні закони регулювання які допоможуть підвищити продуктивність компресорної установки. Наразі проблематично знайти готову математичну модель і тому дана робота дозволить вирішити дану проблему та отримати в наявність готову модель яку можливо все застосовувати для більш детального вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчаючи останні публікації у відкритих джерелах інформації, було виявлено, що саме повноцінної інформації, де би була повністю описана а потім і

представлена математична модель компресорної установки по розрідженню природного газу. Лише окремі математичні моделі різних деталей даного об'єкта, але щоби все було зібрано в одну математичну модель, такого не має в наявності у відкритих джерелах. Були вивчені публікації наступних авторів: Шаміна В.А., Галеркін Ю.Б. та ін.

Формулювання цілей статті. Розробити повноцінну модель компресорної установки для зрідження природного газу.

Виклад основного матеріалу. Спочатку треба все таки знати, а навіщо взагалі нам такий об'єкт як компресорна установка для зрідження природного газу. На даний момент, природний газ є найчистішим і одним з найдешевших органічних видів палива. Основною проблемою природного газу є транспортування на велику відстань. Рішенням цієї проблеми є скраплення газу за допомогою криогенних установок. В 2018 р. імпорт зрідженого природного газу (ЗПГ) склав 600 млн. тон по всьому світу, проте в найближчі 20 років імпорт ЗПГ має зрости в 2–3 рази що обумовлює необхідність розробки більш продуктивних і економічних шляхів виробництва ЗПГ. Особливе значення скраплення метану набуває в умовах дефіциту транзиту традиційним методом природного газу. Створення потужностей по виробництву рідкого метану – один з головних шляхів відходу від газової залежності будь-якої держави або підприємства. Головна перевага скраплення метану – зменшення обсягів кожного кубометра в 600 разів при атмосферному тиску і температурі $-161,45\text{ }^{\circ}\text{C}$. В зв'язку з небезпечністю виробництва та великими енергетичними витратами, створення такого виробництва неможливе без системи автоматизації.

Тепер у нас з'являється чітке розуміння того, навіщо взагалі потрібен даний об'єкт і чому важливо максимального його дослідити, адже без цього буде неможливо створити ефективну систему автоматизації для цього об'єкта.

Ще треба коротко описати компресорну установку для зрідження природного газу. Відцентрові компресори представляють собою обладнання, що входить до групи компресорів динамічного типу з радіальною конструкцією. Головною перевагою установок даного типу є їх висока продуктивність, яка в рази перевищує показники компресорів інших видів. Завдяки цьому, відцентрові компресори, структура яких дозволяє використовувати їх при інтенсивній експлуатації, широко використовуються в промислових масштабах.

Компресорні установки, що відносяться до групи обладнання відцентрового типу, являють собою широке розмаїття агрегатів, різних за своїми характеристиками і технічним оснащенням. Але при цьому, відцентровим компресорів характерно загальне стандартне оснащення. Так, обладнання даного типу включає в себе такі основні елементи, як:

- корпус обладнання;
- патрубки – вхідний і вихідний пристрої;
- робочі колеса;
- дифузор;
- привід – може бути різних типів (дизельний, електричний та інші).

Основними перевагами проточних частин відцентрового компресора з осерадіальними робочими колесами є: підвищена витрата, яка виражається в коефіцієнті витрати та підвищений напір (коефіцієнт питомої роботи).

Завдяки цим якостям відцентрові ступені з осерадіальними робочими колесам в порівнянні зі звичайними сходами з циліндричними робочими колесами при одних і тих же початкових умовах відрізняються підвищеною швидкохідністю і суттєво зниженими габаритними розмірами.

В компресорній установці використовується холодоагент змішаного типу, за допомогою якого здійснюється охолодження природного газу до необхідної температури зрідження.

Охолодження здійснюється за рахунок випаровування холодоагенту високого тиску у теплообмінник через який проходить газ. Далі холодоагент сепарується і проходить через компресор, який підвищує його тиск до заданого (5,1 МПа). Під час випаровування, холодоагент поглинає внутрішню енергію газу тим самим знижуючи температуру газу до температури конденсації ($-163\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Детально вивчивши, що являє собою компресор для зрідження природного газу та повністю розглянувши принцип дії, час все таки перейти до створення математичної моделі об'єкта. А саму математичну модель можна скласти якщо є повне розуміння про даний об'єкт та знати як протікає технологічний процес по розрідженню природного газу в компресорі. Адже без цієї інформації не буде можливості скласти повноцінну математичну модель компресора, так як не було б повної картини яка б показала як проходить процес зрідження та як це робить компресор. Можливо було б розробити математичну модель, вивчивши даний об'єкт хоча б на 50 %, але здається що така математична модель була би не дуже ефективною так як не до кінця були би вивчені всі можливості об'єкта та його властивості. Хоч математична модель і являє собою спрощену модель реального об'єкта, але все таки треба знати майже все про компресор, щоби модель вийшла більш достовірною. І лише завдяки детальному вивченню, буде можливо розробити повноцінну математичну модель, яка дозволить в майбутньому більш якісно проводити дослідження для цього об'єкта по створенню автоматичної системи керування.

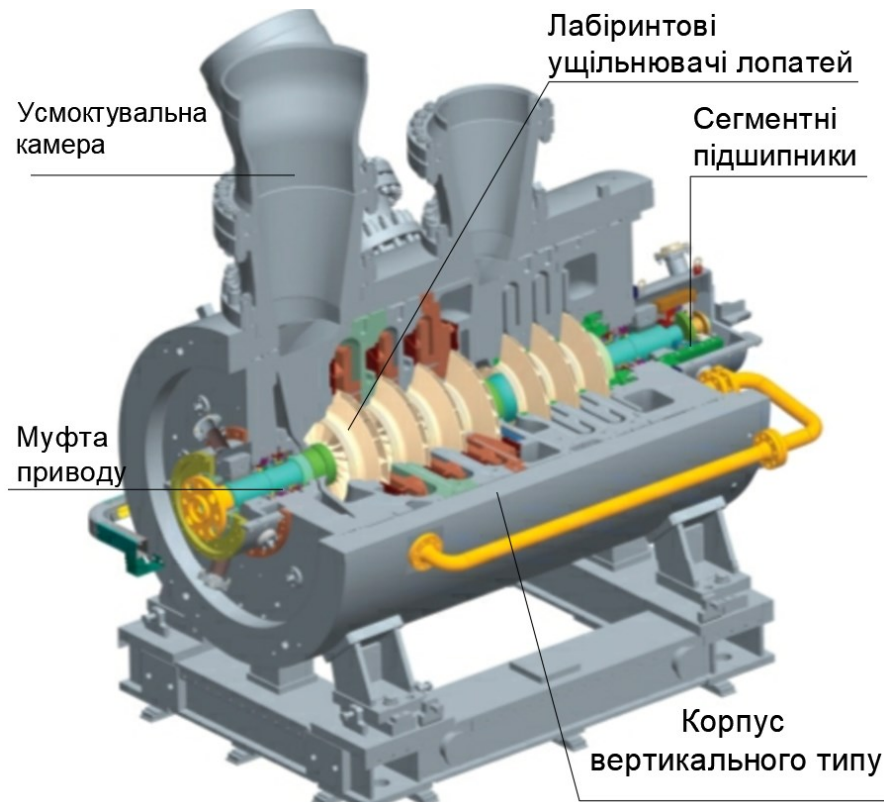


Рис. 1. Модель відцентрованого компресора K905-71-1C

Розглянемо математичну модель компресорної установки по контуру холодоагенту. Отже, стабілізувати на підставі уставки будемо – тиск холодоагенту. Параметрична схема компресора приведена нижче. З даної параметричної схеми зрозуміло, що входним впливом на компресорну установку для зрідження природного газу є частота обертання. З цієї самої схеми і випливає наступне, а саме що збуренням для даного об'єкта буде випаровування холодоагенту. Маючи в наявності як входні параметри так і збурюючий вплив, на виході ми будемо мати тиск холодоагенту. Треба насамперед виділити дану параметричну схему, адже саме вона дає зрозуміти, які взагалі параметри будуть використовуватись для будівництва математичної моделі компресора для зрідження природного газу. Дана схема дає більш конкретно зрозуміти, з якими саме параметрами буде проводитись робота для розрахунку майбутньої математичної моделі яка в подальшому буде використовуватись і для більш якісного дослідження даного об'єкта. Також схема дає зрозуміти основні параметри, які у нас є на самому початку, який параметр буде являти собою збурення та який параметр у нас буде на виході. Ця схема і виступить у подальшому орієнтиром для побудови математичної моделі.

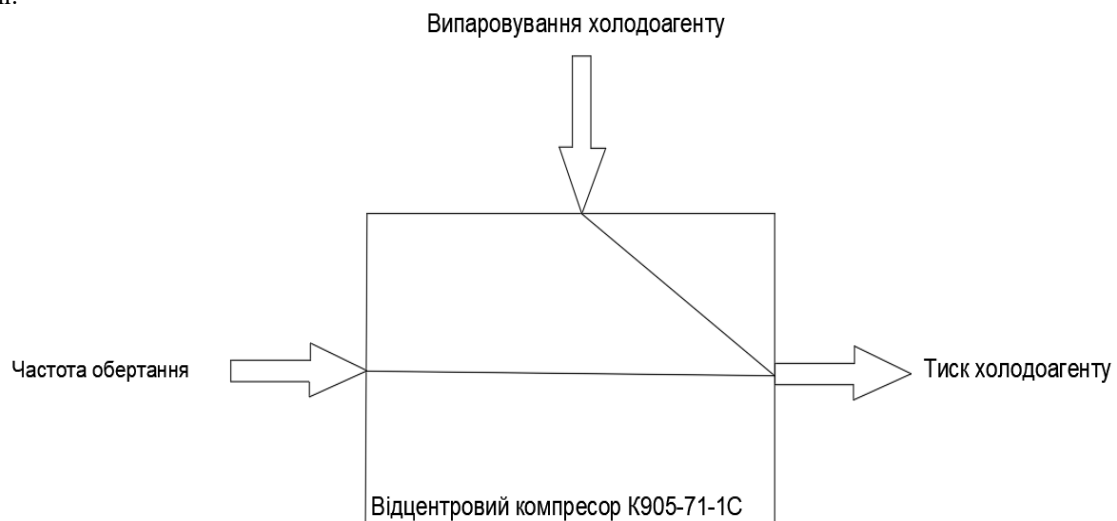


Рис. 2. Параметрична схема компресорної установки

Передавальна функція асинхронного двигуна в спрощеному варіанті, при $(\gamma/\nu)^2 = 1$ [1, с. 296].
Перша частина передавальної функції асинхронного двигуна виглядає наступним чином:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta w_1(p) - \Delta w(p)} = \frac{1}{T_{эл}p + 1} = \frac{750}{1,033p + 1}$$

Друга частина передавальної функції асинхронного двигуна виглядає так:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta M(p) - \Delta M_r(p)} = \frac{1}{T_m p} = \frac{1}{0,0145p}$$

де T_m , $T_{ел}$ – механічна і електромагнітна постійна часу двигуна, відповідно.

Компресорна машина являє собою відцентровий агрегат для виробництва стисненого холодоагенту і діє аналогічно відцентрового насоса.

Робота відцентрових сил на шляху від входу в між лопатеві канали до виходу з них призводить до збільшення енергії потоку. Найпростіша теорія компресорних машин, що володіє прийнятною точністю, ґрунтується на термодинаміці ідеального газу.

В нашому випадку використовується закон Бойля–Маріотта, тобто обсяг газу пропорційний тиску при постійній температурі, використовуваний закон виражає ізотермічний процес: $PV = \text{const}$, $T = \text{const}$.

При ізотермічному стисканні витрачається найменша кількість енергії в компресорному процесі. Маємо: $PV = P_1 V_1 = P_2 V_2$.

Для реалізації відцентрового компресора в одиночних трубопроводах використовується аперіодична ланка другого порядку, проте в більшості випадків приймається до уваги ще й запізнювання, але так як труба не має великої довжини і розгалужень, в даній системі немає сенсу ставити запізнювання. Таким чином, передатна функція компресора виглядає наступним чином:

$$W_{com} = \frac{k_c}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

Розраховану математичну модель необхідно реалізувати в середовищі Simulink.

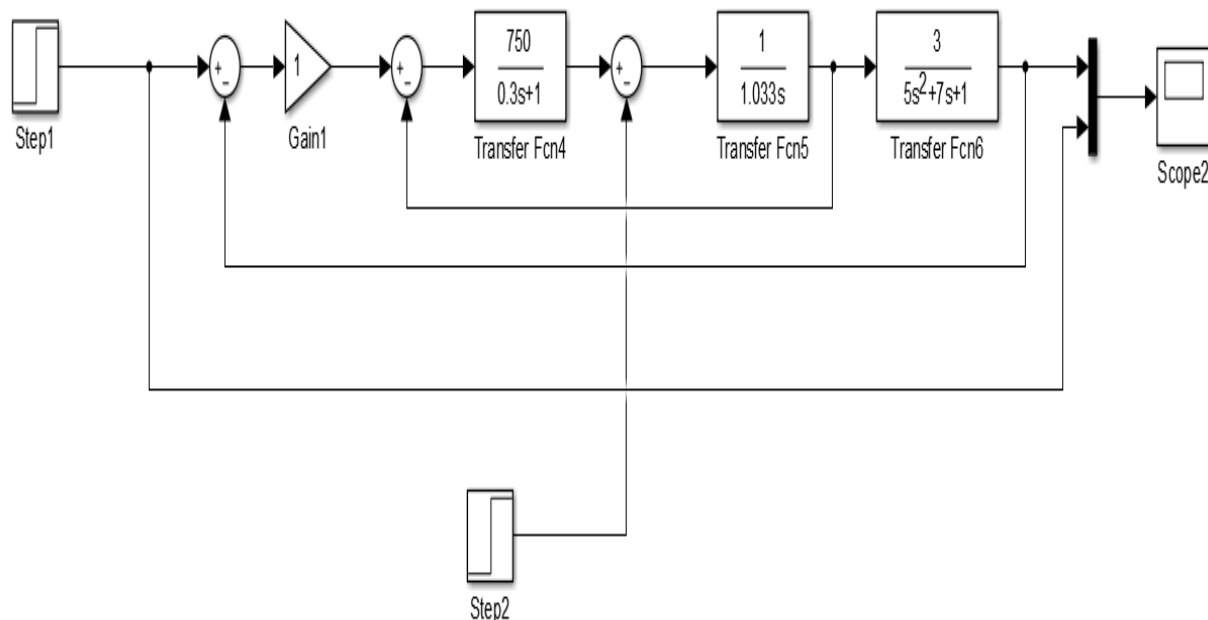


Рис. 3. Математична модель компресорної установки в середовищі Simulink

Висновки. У матеріалі більш детально описана математична модель компресора для зрідження природного газу. Всі знання про властивості даного об'єкта були зібрані в одну математичну модель і в результаті була отримана загальна математична модель, яка також була реалізована в середовищі Simulink. Ця модель дозволить в майбутньому більш краще вивчити властивості об'єкта в плані регулювання та дозволить оперативно отримати дані для впровадження системи автоматичного керування.

References

1. Shamina V.A. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh ob'ektiv ta protsesiv. Poshuk molodykh. Zbirnyk naukovykh prats KhII naukovo-tekhnichnoi konferentsii aspirantiv ta studentiv v m. Donetsku 17 – 20 kvitnia 2012 r. Donetsk: DonNTU, 2012. s.305
2. Halerkyn Yu.B., Kozachenko L. Y. Turbokompresory: Uchebnoe posobyе. Sankt-Peterburh: yzdatelstvo Polytekhnicheskoho unyversyteta, 2008, 374 s.
3. Cherkasskyi V.M. Nasosy, ventyliatory, kompressory: Uchebnoe posobyе dlia vuzov. Moskva: Enerhoatomyzdat, 1984, 316 s.

УДК 539.3

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-67-1-3

ВАСИЛЬЧЕНКО І. П.

Уманський національний університет садівництва

САЧАНЮК-КАВЕЦЬКА Н. В.

Вінницький національний технічний університет

БАРАНЕНКО Р. В.

Уманський національний університет садівництва

ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ ТА ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

У цій роботі представлена структура та функціональність zFunction, що є адаптивною розподіленою обчислювальною платформою, яка підтримує зручну модель програмування для розробки додатків для паралельної обробки. Це дозволяє розробникам розробляти програмне забезпечення як би вони програмують для одного комп'ютера, а потім він автоматично піклується про розподіл даних та паралелізацію завдань на різних вузлах кластера або декількох ядрах центрального процесора. Zфункція таким чином істотно покращує продуктивність складного розподіленого програми, що обробляють велику кількість даних у режимі реального часу, це критично важливі системи.

У цій роботі використано репрезентативне тематичне дослідження з домену фінансових послуг, щоб показати, як zFunction може отримати вигоду від цих типів програм.

Ключові слова: інженерна мережа, інструменти тестування, моделі програмування, безперервність бізнесу, інформаційні технології.

IVAN VASYLCHENKO

Uman National University of Horticulture

NATALIA SACHANIUK-KAVETS'KA

Vinnitsia National Technical University

ROMAN BARANENKO

Uman National University of Horticulture

DISTRIBUTION SYSTEMS AND PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGIES

High performance computing (HPC) has recently become important in several sectors, including science and manufacturing.

To build powerful systems requires a combination of software models to increase system parallelism, especially dual and three-tier programming models to increase parallelism in disparate systems, including CPUs and GPUs.

However, building systems with different programming models is error-prone and complex, and difficult to verify. In addition, testing parallel programs is already a difficult task, as parallel errors are difficult to detect due to the indeterminate behavior of the parallel application. Integrating multiple programming models into a single application complicates testing, as this integration can lead to new types of errors.

Despite efforts to create tools for testing parallel systems, much remains to be done, especially when testing heterogeneous and multilevel programming models.

This paper presents the structure and functionality of zFunction, which is an adaptive distributed computing platform that supports a convenient programming model for developing applications for parallel processing. This allows developers to develop software as if they were programming for a single computer, and then it automatically takes care of data distribution and task parallelization on different nodes of the cluster or multiple CPU cores. The z function thus significantly improves the performance of a complex distributed program that processes large amounts of data in real time, these are critical systems.

This paper uses a representative case study in the field of financial services to show how zFunction can benefit from these types of programs.

Key words: engineering network, testing tools, programming models, business continuity, information technologies.

Постановка проблеми. Високопродуктивні обчислення (HPC) останнім часом набувають важливого значення в декількох секторах, включаючи наукову та виробничу галузі.

Для побудови потужних систем необхідна комбінація програмних моделей для збільшення паралельності системи, особливо подвійних та трирівневих моделей програмування для збільшення паралельності в різномірних системах, що включають центральні процесори та графічні процесори.

Однак побудова систем з різними моделями програмування є схильною до помилок і складною, а також важко перевірити. Крім того, тестування паралельних програм вже є складним завданням, оскільки паралельні помилки важко виявити через невизначену поведінку паралельного додатка. Інтеграція декількох моделей програмування всередину одного додатку ускладнює тестування, оскільки ця інтеграція може спричинити помилки нового типу.

Незважаючи на зусилля, спрямовані на створення інструментів тестування паралельних систем, ще потрібно зробити багато роботи, особливо при тестуванні різномірних та багаторівневих моделей програмування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високопродуктивні обчислювальні технології (НРС) в даний час є частиною всіх наукових та виробничих секторів, що зумовлені вдосконаленням машин НРС, особливо з урахуванням зростаючої уваги до суперкомп'ютерів Exascale, що, як вважають, можливо здійснити до 2022 року в рамках різних досліджень.

Це постійне вдосконалення являє собою складне завдання побудови масивно паралельних систем, які можна використовувати в цих супермашинах. Паралельні програми повинні бути без помилок, щоб задовольнити вимоги та переваги можливостей використовуваної моделі програмування. Тестувати такі програми дуже важко через їх величезні розміри, мінливу поведінку та інтеграцію між різними моделями програмування в одному додатку.

Мета роботи. Дослідити існуючі інструменти тестування, які перевіряють паралельні системи для виявлення помилок під час роботи та класифікуємо перевірені засоби тестування за різними категоріями та підкатегоріями на основі використовуваних методів тестування, моделей цільового програмування та виявлення помилок під час виконання.

Постановка задачі. Цей документ намагається дослідити різні доступні засоби тестування та методи, які виявляють помилки під час виконання в паралельних додатках, що використовують моделі програмування, включаючи однорідні та неоднорідні системи.

Розглянути та вивчити різні інструменти та техніки залежно від різних факторів та характеристик. Цей огляд досліджуватиме, що ще потрібно зробити при тестуванні паралельних систем та напрямки майбутніх досліджень у цій галузі.

Виклад основного матеріалу. Паралельне програмування стає все більш важливим для дослідників та розробників широкомасштабних розподілених та паралельних застосувань у ряді доменів, включаючи оцінку та моделювання фінансових ризиків (наприклад, оцінку ризику вартості та історичні розрахунки), прийняття рішень у реальному часі, створення на основі алгоритмічного зворотного зв'язку (наприклад, створення ринку, арбітраж електронних стратегій та високочастотна торгівля), а також обробка, архівування, зберігання та пошук сховищ вмісту для корпоративних систем управління контентом (наприклад, веб-сайтів новин та веб-енциклопедій).

З появою товарних багатоядерних процесорів та систем хмарних обчислень дослідникам та розробникам також потрібні нові методи паралельного програмування, які можуть максимально використовувати такі системи. Традиційні методи паралельного програмування, такі як передача повідомлень [8] та обчислювальна мережа загальної пам'яті [15], були застосовані дослідниками в університетах та національних лабораторіях для розробки та розгортання розподілених та паралельних додатків масштабів підприємств. Однак паралельна розробка додатків залишається складною проблемою, у сфері широкомасштабної розробки розподілених та паралельних додатків, де традиційні технології обчислювальних мереж не можуть бути застосовані через наступні обмеження:

- складні моделі програмування, яким не властива підтримка для таких функцій, як виявлення вузлів, розповсюдження даних, балансування навантаження та контроль паралельності. Заявки, написані нами. Такі методи не добре масштабуються для складних критично важливих систем;
- традиційні технології обчислювальних мереж не є агресивними на платформі;
- існує крута крива навчання, задіяна в освоєнні цих паралелей паралельного програмування.

Для вирішення цих обмежень розробили адаптивне розподілене обчислювальне проміжне програмне забезпечення під назвою zFunction, яке покращує широкомасштабні розподілені та паралельні програми, створюючи адаптивні обчислення в режимі реального часу та розподілені обчислення за запитом. zFunction надає наступні можливості для дослідників та розробників:

- налаштоване проміжне програмне забезпечення, чиї підключаються служби автоматизують багато втомливих та схильних до помилок заходів, пов'язаних із мережевим програмуванням, включаючи обробку різних мережних протоколів, (де) маршрутизування, відмовостійкість, створення потоків та керування ними, та вдосконалене балансування навантаження через мережу обчислювальних серверів;
- децентралізована архітектура програмного забезпечення, яка не має жодних точок відмови;
- пряма модель паралельного програмування, що дозволяє розробникам складних великомасштабних додатків (наприклад, спільних програм фінансування та обробки даних) підписати програмне забезпечення, яке працює в кластері комп'ютерів так, ніби вони програмують для одного комп'ютера Паперової організації.

Програми обчислювального фінансування, що включають масові моделювання, добре підходять для розподілу та розпаралелювання. На жаль, забороняючі зусилля, необхідні для паралелізації цих застосувань за допомогою традиційних механізмів, обмежили рух фінансової галузі в цьому напрямку.

Оскільки ринки все більше домінують за допомогою електронних торгових систем, ефективність роботи в режимі реального часу стає дедалі критичнішим фактором прийняття своєчасних торгових рішень.

Типовою проблемою, що зустрічається в галузі фінансових послуг, є оцінка ризиків. Методи Монте-Карло [9], що спираються на моделювання, засновані на гіпотетичних сценаріях поведінки ринку, виявились

досить корисними при розрахунках ризиків, особливо для портфелів із похідними фінансовими інструментами. Однак обчислювальна інтенсивність таких методів, як правило, обмежує частоту їх використання. Отже, суттєва вигода від підвищення ефективності таких обчислень. Решта цього розділу представляє тематичне дослідження фінансового аналізу, засноване на обчисленні *value-at-risk* (VaR) [12] з використанням моделювання Монте-Карло для демонстрації ключових проблем проектування розробки паралельних програм обчислювального фінансування.

У фінансовій математиці та управлінні фінансовими ризиками *Value at Risk* (VaR) є широко використовуваним показником ризику збитків для конкретного портфеля фінансових активів. Для даного портфеля, вірогідності та часового горизонту, VaR визначається як порогове значення, таким чином, що вірогідність того, що втрата від ринкової вартості на портфель за даний часовий горизонт перевищує це значення (припускаючи нормальний ринок і відсутність торгів у портфелі) є даною Рівень ймовірності. Для портфелів, що включають традиційні інструменти, такі як акції, розроблено ефективні та обчислювально-економічні аналітичні методи (наприклад, метод дисперсії та коваріації [11, 7]) для розрахунку вартості ризику. Найважливіше, що такі методи спираються на важливі припущення про характер розподілу збитків, включаючи умову, що це нормальний розподіл. Отже, такі алгоритми не можна застосовувати до портфелів, що містять екзотичні інструменти (наприклад, опціони та інші похідні інструменти), а менеджери ризиків повинні вдаватися до більш узагальнених методів.

Завдяки своїй загальності методи Монте-Карло часто використовуються для розрахунків VaR для портфелів з опціями. Замість того, щоб моделювати майбутню ефективність портфеля на суто теоретичних обговореннях, такі методи моделюють великий, репрезентативний набір можливих сценаріїв продуктивності, а потім базують вимірювання VaR на підсумках результатів.

Одним із варіантів таких методів – проектування портфелів з опціонами – є використання історичних показників базових цінних паперів опціонів у випадково обраних проміжках часу для формування правдоподібних сценаріїв майбутніх цінних паперів.

Оскільки існують потужні алгоритми (такі як модель Блека-Шоулза [5] та модель біноміального дерева [6]) для прогнозування опціонних цін на основі базових цін, такі сценарії можуть бути розширені, щоб генерувати прогнози щодо ефективності всіх позицій у портфелі, і, отже, загальна ефективність портфоліо. Хоча такі методи Монте-Карло (ми використовуємо методи Монте-Карло на основі історичного моделювання) є загальними та універсальними, вони надзвичайно обчислювальні. Зокрема, алгоритми виведення цін на опціони з тих, що лежать в їх основі, цілком задіяні, а обчислювальні витрати поєднуються з тим фактом, що багато таких прогнозів необхідно розрахувати, щоб сформувати досить велику кількість сценаріїв для надійного статистичного аналізу. Дійсно, обчислювальні витрати на такі розрахунки часто є фактором, що обмежує їх ширше використання у фінансовій галузі.

Типова послідовна реалізація VaR Calculation де вхідні дані та результати для обчислень часто розміщуються в додатках, таких як електронні таблиці Microsoft Excel, а обчислення контролюються Visual Basic для Application script. Актуальні розрахунки можуть виконуватися або в процесорі Excel, делегованому іншому процесу в конфігурації клієнт / сервер. Цей документ зосереджується на репрезентативному обчисленні VaR, де обчислювальним завданням є оцінка одноденного значення ризику для портфеля з позиціями в акції, індексу та ряду американських опціонів на ці цінні папери.

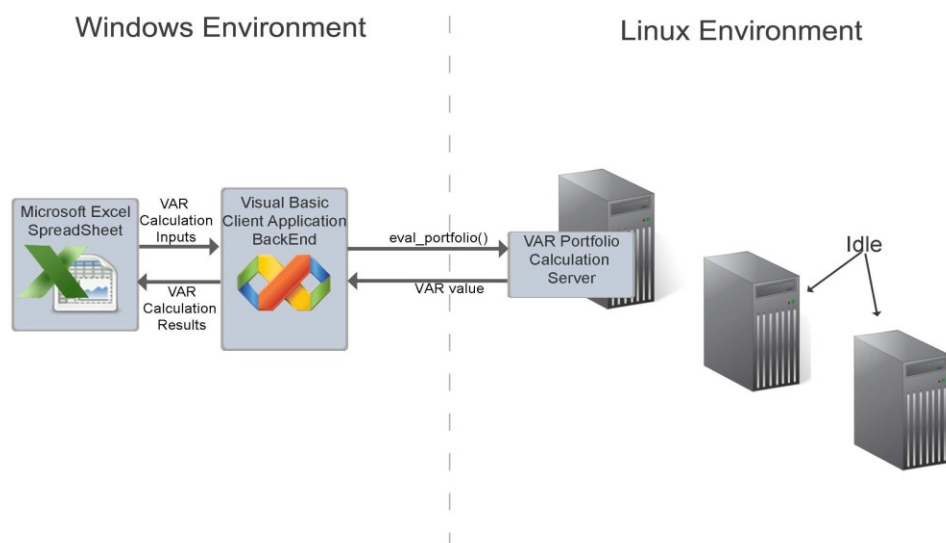


Рис. 1. Архітектура послідовного обчислення

На рис. 1 показана архітектура такого послідовного обчислення VaR, де програма aVisual Basicclient обчислює VaR для набору портфоліо (вхідні дані яких зберігаються в Microsoft Excelsprepreheet) шляхом виклику повторних запитів в бібліотеці оцінки VaR, розміщеній на сервері Linux. Карлосимуляція досягає цього розрахунку VaR за допомогою (1) обчислення вартості портфеля в кінці часового горизонту за великої кількості сценаріїв поведінки на ринку та (2) кількісне визначення максимальних збитків, що очікуються з заданою ймовірністю (тобто довірчий інтервал моделювання), 30 акцій та один фонд відстеження індексів відповідають нашому портфелю. Ми збираємо історію щоденних повернень запасів за два роки, що передують даті обчислення VaR, у таблиці Microsoft Excelspreadsheet. Наступним кроком є створення 1000 нечітких сценаріїв шляхом випадкового вилучення 1000 наборів повернень та обчислення базового значення VaR за 1 день.

Як показано на рис. 1, функція обчислення VaR вбудована в бібліотеку, розміщену на машині Linux. Аналогічним чином, клієнтом для цього обчислення є anExcelspreadsheet, а виконувана програма aVisual Basicclient допомагає таблиці Excelspreadsheets робити віддалені виклики в бібліотеці Linux.

Виклики проектування паралелізації розрахунку VaR У нашому прикладі ми маємо американські варіанти з дискретними роздільними ідеями для окремих запасів, оскільки для них не існує рішення закритої форми, і для розрахунку ціни потрібно використовувати трудомісткі біноміальні дерева.

Отже, наступні обчислювальні кроки беруть участь у обчисленні 1-денного VaR: (1) випадковим вибором історичних дат, (2) застосуванням повернень за кожну історичну дату до базових цін на початкову дату, щоб отримати сценарій для базових цін в кінці часовий горизонт, (3) для кожного сценарію цін на базові цінні папери, оцінка цін усіх опціонів у портфелі, та (4) після оцінки всіх сценаріїв, формування імітованого розподілу значень портфеля та обчислення VaR. розрахунки логічно незалежні і досить численні в рамках аналізу єдиного портфеля, цей розрахунок VaR має велику паралельність, яку можна використати, і його легко розпаралелювати.

Хоча паралелізація забезпечує реалістичний та економічний спосіб поліпшити ефективність суханалізу, звичайні реалізації цього паралельного розрахунку мають ряд конструктивних проблем при розвантаженні послідовних розрахунків паралельно працювати на сотнях або тисячах розподілених обчислювальних серверів.

Завдання 1: виявлення та адресація віддалених обчислювальних серверів для розподілених обчислень. Якщо розробники додатків пишуть вихідний код вручну для паралельного програмування, їм доведеться ідентифікувати IP-адреси клієнта та серверних машин, визначати багатоадресні адреси, а також обробляти варіанти, пов'язані з базовим мережевим стеком, для передачі запитів та відповідей через мережі.

Більше того, цей процес буде повторюватися щоразу, коли змінюються основні платформи, наприклад, вхідні дані можуть бути переміщені з таблиці Excel до бази даних, або сервер обчислення VaR може бути переміщений з Linuxhost на aSolarishost.

Незалежно від цих змін у топології мережі, апаратного забезпечення та платформи, дані обчислення VaR повинні розподілитися, а розподілені обчислення повинні виконуватися. Як описано вище, вручну змінювати вихідний код для обробки таких складних випадків використання важко.

Завдання 2: поширення даних для віддаленого розподіленого обчислення. Розподілені обчислення передбачають перетворення внутрішнього стану програми (наприклад, вхід для обчислення VaR, що зберігається в електронній таблиці Excel), у зовнішній формат, який можна передати через мережу на віддалені обчислювальні сервери. Техніка програмування, яка використовується для здійснення цього перетворення, називається маршалінгом, а зворотний процес перетворення зовнішнього формату даних у внутрішній формат даних називається демаршалінг.

Історично розробники додатків вручну писали (де) маршируючий код для задоволення розподілених обчислювальних вимог обчислень VaR. Цей (де) маршовий код сильно залежить від формату даних, що надсилаються, і платформ, що розміщують процеси клієнт-сервер, що ускладнює ручну розробку вихідного коду.

Завдання 3: ефективне розповсюдження віддалених обчислень для ефективного управління ресурсами в мережі. Після того, як розробники додатків розробляють рішення завдань 1 і 2 вище, для розповсюдження запитів між різними серверами обчислень необхідні інтелектуальні алгоритми планування та розподілу запитів. Ефективне розповсюдження запитів гарантує, що (1) ефективно використовуються всі апаратні ресурси, (2) віддаленим обчисленням не заважає дисбаланс навантаження між серверами обчислень, а також (3) клієнти захищені від неоднорідних можливостей апаратного та програмного забезпечення.

Завдання 4: відмовостійкість та застосування прозорого виявлення несправностей та відновлення. Коли віддалені обчислювальні сервери виконують дуже сильні складні розрахунки додатків, апаратні збої можуть зірвати обчислення. З такими типами відмов потрібно боротися з необхідністю, оскільки і обчислювальний сервер(и), і зв'язки зв'язку можуть бути недоступними. Розробка вихідного коду для забезпечення відмовостійкості може включати написання коду для виявлення несправностей, ідентифікацію

запитів, які обчислював сервер, що не працює, повторне надсилання цих запитів на альтернативний сервер та вжиття заходів щодо омолодження, таких як перезапуск невдалих серверів.

Питання коду інфраструктури відмовостійкості для кожного додатка є складним та схильним до помилок процесом, що ускладнює розробникам програм швидке розпаралелювання існуючих фінансових програм.

Завдання 5: управління паралельністю. Обчислювальні програми для фінансування, такі як обчислення VaR у нашому прикладі, часто дуже обчислювальні. Тому ці програми можуть отримати значну користь від належного управління паралельністю, коли всі ядра в багатоядерному процесорі ефективно використовуються для оптимізації розрахунків. Програмування цих проблем вимагає від розробників додатків явного управління паралелізмом шляхом створення потоків та синхронізації цих потоків з повідомленнями та блокуваннями. Цей процес необхідно повторити для кожної платформи, оскільки API програмування потоків відрізняються від платформи до платформи, наприклад, відмінності в API потоків між Windows і Linux. В ідеалі розробники додатків повинні розробляти вихідний код на основі способу агностики платформи, щоб запити на додатки могли бути оптимізовані залежно від наявності одноядерних та багатоядерних процесорів. може вирішити описані вище розподілені та паралельні проблеми розробки додатків, пов'язані з великомасштабними програмами обчислювального фінансування. інтенсивні програми в мережевому середовищі:

- Test Configuration Environment (TCE) – це утиліта конфігурації програми, яка виявляє, перевіряє та управляє всіма програмами в розгортанні. Він управляє обчислювальними серверами, клієнтами та утилітами моніторингу та забезпечує IP-адреси та багатокадрові адреси для розподіленого середовища виконання;

- zNet – це оптимізована система балансування навантаження, пов'язана з клієнтськими програмами і, отже, знаходиться в адресному просторі клієнта. zNet автоматично розподіляє обчислення на всіх доступних серверах, прозора паралелізує виконання масштабованим, відповідальним та ресурсозберігаючим способом, а також покращує продуктивність на порядки порівняно зі звичайними техніками програмування;

- zEngine, який є обчислювальним серверним контейнером, який встановлюється і запускається на (потенційно неоднорідних) цільових машинах. Це контейнер, в якому фактично виконуються паралелізовані обчислення. ZEngine використовує основні механізми планування операційної системи (тобто створення потоків, синхронізація та управління потоками, що знають ядро), щоб максимізувати використання процесора, виконуючи екземпляр паралелізованої функції на кожному ядрі (загальна практика полягає в тому, щоб запускати якомога більше zEngineinstance на кожному хості, оскільки є ядра процесора);

- zPluginbuilder – це утиліта, яка використовується для адаптації бібліотеки послідовних клієнтів у паралелізуються бібліотеки плагінів, які можуть розпаралелювати складні обчислення за допомогою проміжного програмного забезпечення zNet;

- zAdmin, який є утилітою для управління (тобто моніторинг, інсталювання, запуск та зупинка) ресурсів та програм у системі або графічно, або за допомогою командного рядка.

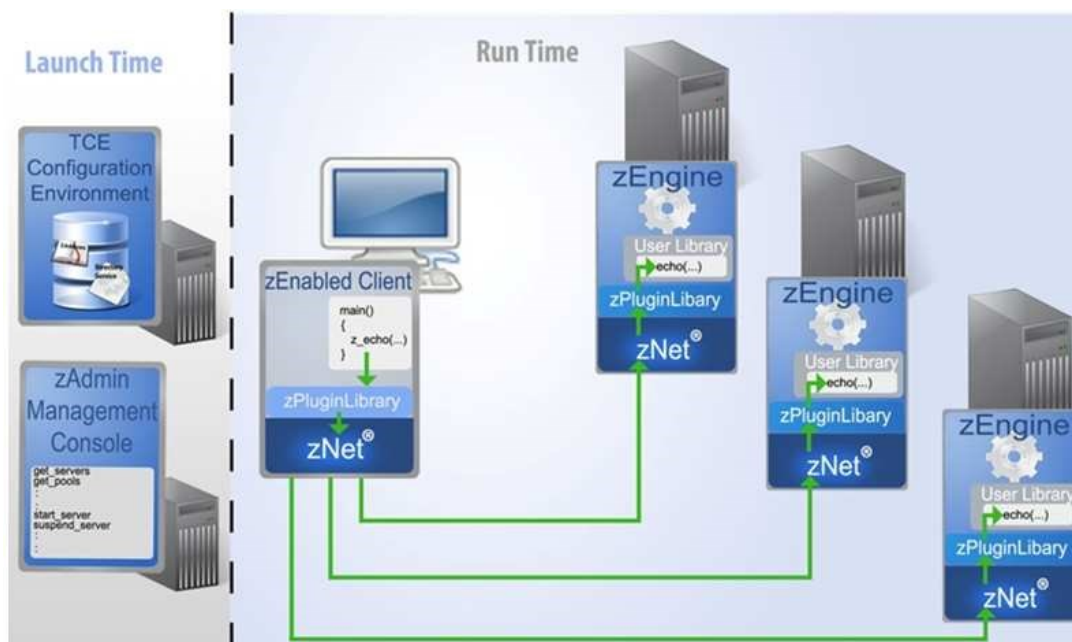


Рис. 2. Компоненти zFunction

Увімкнення за допомогою `zFunctionAdapters` та `zPluginLibraries` Будь-яке послідовне застаріле додаток, яке виконує складні обчислення на великих наборах даних, можна розпаралелювати за допомогою `zFunction`. Паралелізація послідовного додатка (який ми називаємо `zEnabling`) передбачає кроки для зв'язку програми з проміжним програмним забезпеченням `zFunction`, що прозоро охоплює проблеми розподіленої та паралельної обробки від додатків.

`ThezEnablingprocess` захищає розробників додатків від проблем низького рівня розподілу, таких як виявлення, адресація, (de) маршируючи запити та відповіді та займаючись змінами в стеках мережевого протоколу, що дозволяє відмовитись, так що програми можуть безперешкодно взаємодіяти з будь-якою платформою та мовою програмування.

`zEnabledapplication` містить еквівалент `zFunctionAdapterz_F` для кожної функції, що паралелізується. Розробникам клієнтських додатків потрібно лише замінити виклики `toF` з викликами `toz_F` для розпаралелювання.

`ZFunctionAdapterz_F` – це проксі-сервер на стороні клієнта, який прозоро розподіляє асинхронні запити на `zEngines`, забезпечуючи тим самим адаптивні, розподілені та високопродуктивні обчислення на попит на клієнтські програми. `zFunction` використовує інструмент `zPluginBuilder` для бібліотек `zEnablinguser`.

Вхідними даними інструменту `zPluginBuilder` є файл XML, що описує функцію `F`, її вхідні параметри, вихідні параметри та розташування бібліотеки, що містить визначення функції `F` (рис. 3).

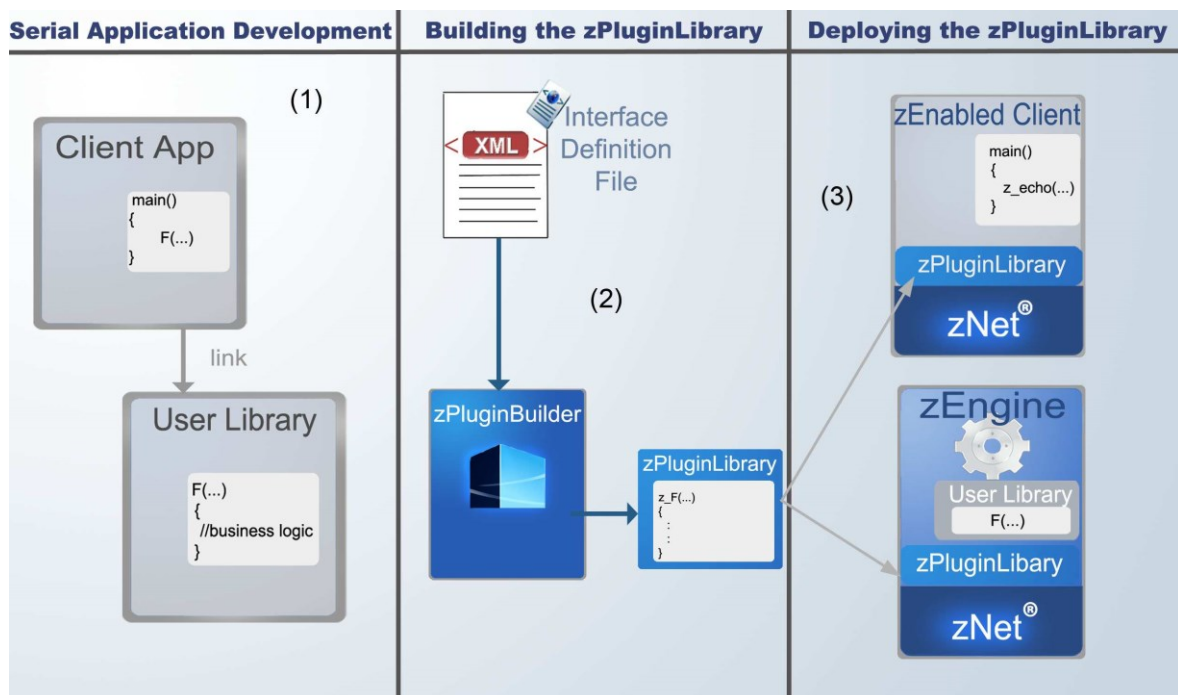


Рис. 3. Вхідні параметри, вихідні параметри та розташування бібліотеки

Вихід – бібліотека (називається `zPluginLibrary`) з реалізацією `zFunctionAdapterz_F`конформ, що відповідає тому ж інтерфейсу, що і вихідна функція `F`. Створена `zPluginLibrary` пов'язана як клієнтською програмою, так і `zEngine` (див. праву сторону малюнка 3). На сервері `zPluginLibrary` просто делегує дзвінки, зроблені з клієнтської `zPluginLibrary` (від імені клієнтських програм), до функції `Fdefined` у бібліотеці, створеній службою розробників. Таким чином, користувачі `zFunction`, маючи мінімальну кількість зусиль для розробки, отримують універсальну паралелізовану програму якісного виробництва, яку можна розгорнути в мережі паралельних обчислювальних вузлів компоненти, показані на рис. 2, стосуються розподілених ключів та розпаралелізують завдання проектування додатків.

Вирішення проблеми 1: надання інформаційної послуги для виявлення та адресація віддалених обчислювальних серверів. Конфігураційне середовище (TCE) діє як інформаційна служба для `zFunction` та завантажує всі програми в мережі. Інші компоненти у розгортанні `zFunction` (включаючи клієнтів та `zEngines`, які виконують віддалені обчислення) реєструються в TCE під час запуску. Цей процес дозволяє TCE визначати параметри мережі, такі як IP-адреси хоста, ідентифікація підмережі мережі, адреси багатоадресної передачі. TCE використовує протокол рукописання, який забезпечує мережеву інформацію для всіх компонентів `zFunction`, завдяки чому додатки можуть спілкуватися між собою під час виконання, не співпрацюючи з TCE.

zFunction дозволяє розробникам додатків оптимізувати роботу системи, забезпечуючи гнучкі механізми розповсюдження даних. zFunctionclients не надсилають дані з кожним запитом; натомість дані надсилаються лише один раз, і з кожним запитом zFunction надсилає посилання на кожен сервер, де дані можна знайти. Більше того, якщо нові дані потрібно оновлювати в середині обчислень, zFunction також надає механізм сигналізації всіх серверів і дозволу їм досягти загального знімка або контрольної точки, отримати нові вхідні дані від клієнта, а потім відновити обчислення.

ZFunction надає утиліту zPluginBuilder, яка автоматично генерує zPluginLibraries, що служать адаптерами між загальним проміжним програмним забезпеченням zFunction та конкретними програмами клієнт / сервер. Ці адаптери випускають ефективний (де) маршалінговий код, що дозволяє проміжному програмному забезпеченню zFunction прозоро підтримувати віддалену комунікацію на різних платформах і мережах.

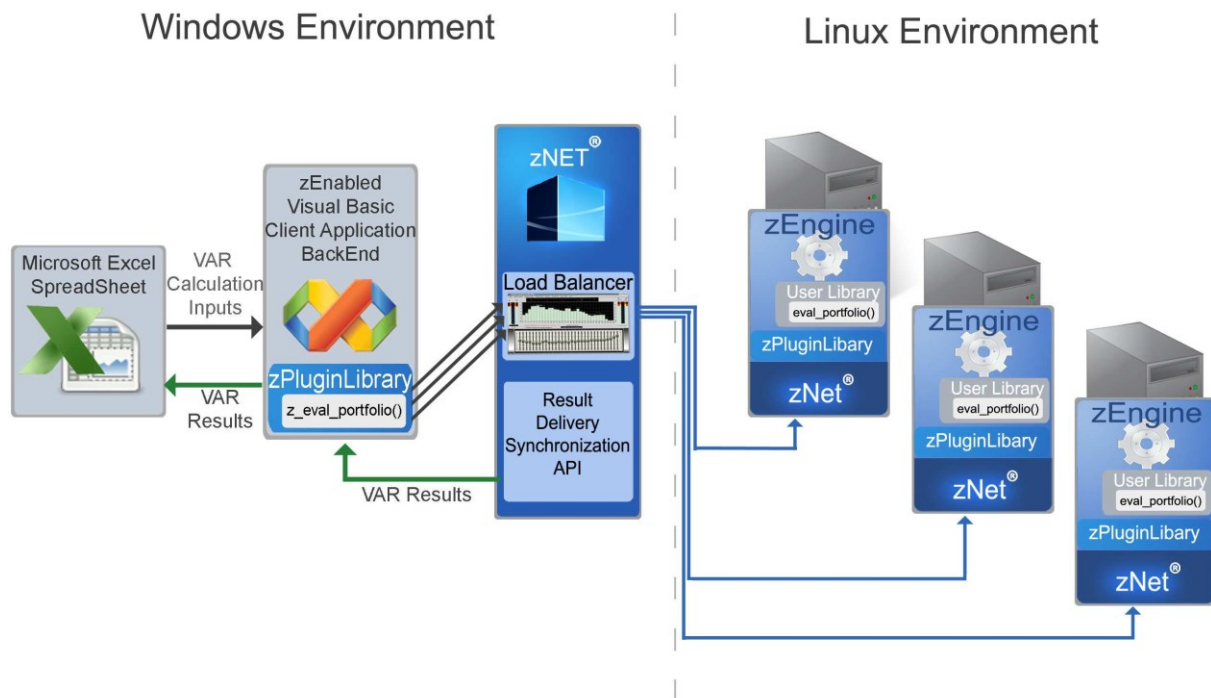


Рис. 4. Рівномірний розподілу роботи між існуючими комп'ютерними серверами

Вирішення проблеми 3: забезпечення ефективного управління ресурсами віддалених обчислювальних серверів. Коли повторні запити клієнта zEnabled надсилаються в пул серверів, інтелектуальний балансувальний балансир проміжного програмного забезпечення zFunction використовується для рівномірного розподілу роботи між існуючими комп'ютерними серверами в режимі реального часу, як показано на малюнку 4. Розподіляючи обчислення рівномірно на всіх доступних серверах, zFunction максимізує розподіл ресурсів для критично важливих додатків, а також гарантує, що апаратні ресурси використовуються в повній мірі.

Вирішення проблеми 4: забезпечення прозорості для багаторівневого багатопоточного захисту. zFunction також забезпечує виконання додатків незалежно від збоїв обладнання та прозоро забезпечує відновлення за замовчуванням та відмову, повторно виконуючи запити на серверах, які все ще працюють. zFunction відстежує історію виконання кожного запиту і на яку zEngine було надіслано запит. Коли zFunction виявляє, що zEngine вийшов з ладу, він автоматично відправляє запит на новий або омолоджений двигун і гарантує, що обчислення виконуються незалежно від збоїв обладнання.

Вирішення проблеми 5: забезпечення неявної масштабованості за допомогою багатопоточності, що усвідомлює основи. zФункція досягає розпаралелювання за допомогою виконання декількох екземплярів паралелізованої функції програми одночасно в процесах zEngine, що виконуються на різних машинах у мережі. zFunction забезпечує неявну підтримку паралельності та автоматично створює потоки для розподілу запитів на різні сервери, а також синхронізує ці потоки за допомогою message та блокування.

Оновлену програму VaR, яка використовує zFunction для паралелізації обчислень на портфелі акцій та опціонів, представлених як електронна таблиця Microsoft Excels. Як обговорювалося вище, проміжне програмне забезпечення zFunction дозволяє ефективно роз'єднати клієнтський код і реалізації функції, що паралелізується, щоб вони могли працювати на різних платформах, наприклад, Windows для клієнта та Linux для серверів. Більше того, різні частини програми theVaR також можуть бути написані різними мовами, наприклад, Visual Basic для клієнта та C / C++ для серверів. Інтерфейс між клієнтом та функцією

розпаралелювання вказаний стисло у файлі опису інтерфейсу на основі XML. Потім інструмент zPluginBuilder використовується для створення бібліотек плагінів, що підходять як для клієнтської програми, так і для реалізації сервера zEngine. Для цього прикладу клієнтом є Microsoft Excelspreadsheet, який використовує COM-інтерфейс (через Visual Basic) для інтеграції з проміжним програмним забезпеченням zFunction. І навпаки, сервери розгортаються в пулі zEngines, що розгортає бібліотеки Linux C / C++ для розрахунку VaR. 4.1z Впровадження клієнта на основі функцій Клієнтський код цього додатка міститься в Microsoft Excelworkbook, який містить дані про сценарії поведінки на ринку (див. рис. 1), що є природним і типовим середовищем для фінансових розрахунків із великим обсягом даних.

Як показано на рис. 5, клієнт тому може легко підтримувати застарілу послідовну реалізацію розрахунку, написаного у програмі Visual Basic для додатків. На цьому малюнку також показано, як theEEnabledapplication вимагає двох поверхневих перетворень коду на стороні клієнта, вбудованого в електронну таблицю:

- обчислення надсилаються асинхронно, а функція зворотного виклику з роздільною швидкістю отримує відповіді від віддалених zEngines і заповнює цільові клітинки в результаті електронна таблиця з цими відповідями;

- інструмент zPluginBuilder використовується для генерації клієнтського COM-інтерфейсу, що дозволяє викликати відповідну функцію з коду Visual Basicclient.

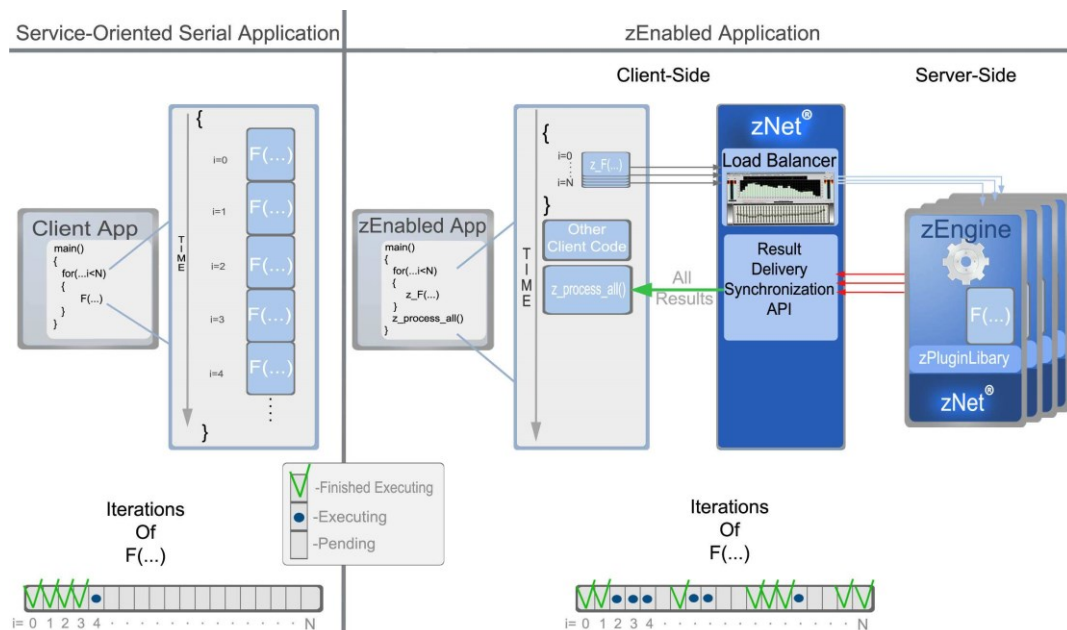


Рис. 5. Підтримка послідовної реалізації розрахунку

Реалізація сервера на основі функцій При розробці серверного коду isEnabledapplication необхідно лише (1) створити користувацьку бібліотеку, що містить функцію, що паралізується, та (2) описати інтерфейс функції за допомогою файлу опису інтерфейсу (у XML). Інструмент zPluginBuilder використовується для створення бібліотеки плагінів, яку можна динамічно завантажувати в zEngines, що працюють на будь-якій підтримуваний платформі, як показано на рис. 3. Реалізація сервера складається з функції aneval_portfolio (), вхідні параметри якої включають визначення портфеля та ціну акцій сценарію та використовує біноміальну модель ціноутворення для оцінки всіх варіантів у портфелі. Кінцевим результатом обчислення для одного сценарію є вартість портфеля. Таким чином, кожен сценарій (який визначається окремим набором гіпотетичних цін на акції в кінці часового горизонту моделювання) дає незалежний та паралельний розрахунок вартості портфеля.

Як показано на рис. 5, zEngines призначені для обчислення, можуть ефективно виконувати всі ці незалежні сценарії обчислень, за допомогою клієнтського балансу навантаження, інтегрованого в проміжне програмне забезпечення zNet, розподіляючи роботу автоматично. Переваги застосування zFunction до тематичного дослідження VAR Автоматизований процес активації zEnabling вирішує всі проблеми, наведені вище, з якими стикаються розробники обчислювальних програм для фінансування.

Як показано на рис. 5, для вирішення проблем 1, 3, 4 та 5 проміжне програмне забезпечення zFunction автоматично забезпечує виявлення, адресацію, балансування навантаження, виявлення несправностей та механізми відновлення, гарантуючи, що всі клієнтські запити, передані йому, будуть виконуватися в

будь-якому випадку, незалежно від зв'язку або відмови сервера. Ця відмовостійкість забезпечується компонентами zFunction по обидва боки мережі, що не вимагає зусиль розробника додатків.

Специфічна для програми zFunction, генерована zPluginBuilder, також капсулює проблеми, пов'язані з надійними розподіленими обчисленнями за інтерфейсом, подібним до інтерфейсу, аналогічного функції синхронної розпаралелізації, тим самим підвищуючи рівень абстракції програмування, досвідчений розробниками додатків. на zFunction з пов'язаною роботою з паралельної розробки та розгортання додатків.

Спеціально-орієнтоване програмування (АОР). Нещодавня робота зосереджена на використанні АОР [13] для відокремлення питань розпаралелювання щодо вихідного коду, специфічного для застосування [10, 17, 14]. Однак для того, щоб забезпечити можливості в режимі реального часу, такі як відмовостійкість, балансування навантаження та розповсюдження даних за допомогою АОР, потрібно використовувати новіші технології, що підтримують композицію аспектів.

zFunction забезпечує всі ці переваги з мінімальними модифікаціями існуючих додатків. Проміжне програмне забезпечення для обчислювальної мережі. Багато проєктів досліджували ідею використання розподілених обчислювальних архітектур для прискорення складних обчислень за кластером комп'ютерів.

Деякі добре відомі приклади включають проєкти SETI @ Home [3] та BOINC [2], в яких використовуються недостатньо використовувані мережеві процесори для виконання загальних завдань.

Аналогічним чином, Frontier (www.frontier.com) надає програмне забезпечення для мереж для використання доступних процесорів для прискорення паралельних програм. Загалом, у цих підходах клієнтські вузли спілкуються через централізований головний вузол для подання завдань, що може збільшити затримку, створити вузькі місця у роботі та дає єдину точку відмови. На відміну від цього, zFunction забезпечує надзвичайно оптимізовану та децентралізовану інфраструктуру проміжного програмного забезпечення для розпаралелювання додатків, міжпроцесорного зв'язку та розподілу даних.

Проміжне програмне забезпечення для прискорення застосувань фінансового інжинірингу. Попередня робота також була зосереджена на розробці та / або застосуванні архітектур сітки та мережевих додатків для застосування фінансових послуг. Наприклад, [16] обговорюється практичний досвід, пов'язаний з проблемами управління даними та продуктивністю, що виникають при розробці додатків для фінансових послуг у суперкомп'ютері IBM Bluegenesuper [1].

Аналогічно, PicosGrid [4] – це відмовостійка та багатопарадигмна програмна архітектура сітки для прискорення фінансових обчислень у великій сітці. Інші системи, що базуються на сітці, включають обчислення платформи (www.platform.com), Data-Synapse (www.datasynapse.com) та Microsoft HPC (www.microsoft.com/hpc), які забезпечують розподілене програмне середовище для фінансових розрахунків. zFunction відрізняється від цих технологій простотою використання та інтеграції, ефективністю роботи в режимі реального часу, здатністю обробляти як малі, так і великі обчислення, підтримкою портативних архітектур та платформ, а також своїми вдосконаленими функціями паралельного програмування, такими як прозора додаткова відмовостійкість, балансування навантаження та неявне програмування потокової спільної пам'яті.

Висновки. Цей документ продемонстрував можливості проміжного програмного забезпечення zFunction, яке може паралелізувати складні обчислювальні та інтенсивно розподілені програми з використанням спрощеного режиму програмування, що створює адаптивне середовище розподіленого компіляційного середовища в режимі реального часу, що захищає від несправностей, на вимогу zFunction добре підходить для доменних мереж, де складні розрахунки в реальному часі потрібні швидко передбачувати, і які можуть отримати вигоду від розподіленої обробки робочого навантаження через (потенційно неоднорідну) мережу. Це може значно підвищити продуктивність таких систем за низьку ціну, дозволяючи додаткам паралельно працювати на апаратному забезпеченні COTS, робочих столах, кластерах та хмарі.

Слід докласти значних зусиль для тестування паралельних систем та виявлення помилок під час виконання, але особливо для систем, що використовують різні моделі програмування, а також дворівневі та тривірневі моделі програмування. Інтеграція різних моделей програмування в одну і ту ж систему потребуватиме нових методів тестування для виявлення помилок під час виконання в неоднорідних паралельних системах. Для досягнення хороших систем, які можна використовувати в суперкомп'ютерах, слід зосередитись на тестуванні систем через їх паралельну природу. Крім того, ці інструменти тестування повинні інтегрувати декілька методів тестування і паралельно працювати над виявленням помилок під час виконання шляхом створення тестових потоків залежно від кількості потоків додатків.

Як результат, використання паралельних гібридних методів збільшить час тестування та охопить широкий спектр помилок під час виконання.

References

1. et. al. Allen, F. Blue gene: a vision for protein science using a petaflop supercomputer. IBM Syst. J., 40(2):310–327, 2011.
2. D. P. Anderson. Boinc: A system for public-resource computing and storage. In GRID '04: Proceedings of the 5th IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing, pages 4–10, Washington, DC, USA, 2014. IEEE Computer Society.
3. D. P. Anderson, J. Cobb, E. Korpela, M. Lebofsky, and D. Werthimer. Seti@home: an experiment in public-resource computing. Commun. ACM, 45(11):56–61, 2016.

4. S. Bezzine, V. Galtier, S. Vialle, F. Baude, M. Bossy, V. D. Doan, and L. Henrio. A fault tolerant and multi-paradigm grid architecture for time constrained problems. application to option pricing in finance. In E-SCIENCE '06: Proceedings of the Second IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing, page 49, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
5. F. Black and M. Scholes. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. The Journal of Political Economy, 81(3), May 1973.
6. J. C. Cox, S. A. Ross, and M. Rubinstein. Option Pricing: A Simplified Approach. Journal of Financial Economics, 4, 1979.
7. D. Duffie and J. Pan. An Overview of Value At Risk. The Journal of Derivatives, 4(3), Apr. 1997.
8. M. Forum. Message Passing Interface Forum. www.mpi-forum.org.
9. P. Glasserman. Monte Carlo Methods in Financial Engineering (Stochastic Modeling and Applied Probability). Springer Verlag, 2017.
10. B. Harbulot and J. R. Gurd. Using aspectj to separate concerns in parallel scientific java code. In AOSD '04: Proceedings of the 3rd international conference on Aspect-oriented software development, pages 122–131, New York, NY, USA, 2016. ACM.
11. J. C. Hull. Risk Management and Financial Institutions. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2006.
12. P. Jorion. Value at Risk: The New Benchmark for Managing Financial Risk. McGraw-Hill, New York, NY, third edition, 2016.
13. G. Kiczales, J. Lamping, A. Mendhekar, C. Maeda, C. V. Lopes, J.-M. Loingtier, and J. Irwin. Aspect-Oriented Programming. In Proceedings of the 11th European Conference on Object-Oriented Programming, pages 220–242, June 1997.
14. M. E. F. Maia, P. H. M. Maia, N. C. Mendonca, and R. M. C. Andrade. An aspect-oriented programming model for bag-of-tasks grid applications. In CCGRID '07: Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid, pages 789–794, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
15. OpenMP. OpenMP Home Page. www.openmp.org.
16. T. Phan, R. Natarajan, S. Mitsumori, and H. Yu. Middleware and performance issues for computational finance applications on blue gene/l. Parallel and Distributed Processing Symposium, International, 0:371, 2019.
17. J. Sobral. Incrementally developing parallel applications with aspectj. Parallel and Distributed Processing Symposium, International, 0:95, 2016.

УДК 681.51

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-67-1-4

ЯРОЦЬКИЙ М. М.

Одеський національний політехнічний університет

ОГЛЯД СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ ПАРОГЕНЕРАТОРА БЛОКУ ВВЕР-1000

Досліджені властивості парогенератора блоку ВВЕР-1000, виведені основні характеристики об'єкта і вказані основні принципи, які допоможуть застерегти від помилок у вивченні даного питання. Представлені види автоматичних систем регулювання та вивчені основні недоліки кожної з систем регулювання. На основі зробленого аналізу було встановлено, яка саме автоматична система регулювання є найбільш краща для парогенератора. Пояснений процес знаходження параметрів регулятора та коефіцієнтів пристроїв зв'язку для каналу витрати пари, витрати живильної води та рівня води в парогенераторі. В більшості публікацій не робиться пояснень, чому використовується 3-імпульсна автоматична система керування, не виконується порівняння з іншими системами регулювання, і просто приводиться вже як факт що використовується 3-імпульсна система регулювання без пояснень та тонкощів налаштування самої системи регулювання. Не робляться пояснення стосовно налаштування регулятора для 3-імпульсної автоматичної системи регулювання і для чого потрібні коефіцієнти пристроїв зв'язку. Тому в статті зроблено пояснення, чому використовується 3-імпульсна автоматична система регулювання а не 2-імпульсна, як правильно налаштувати регулятор рівня води та як налаштувати пристрої зв'язку і для чого вони потрібні. Приведена модель парогенератора в середовищі Simulink та показано яким чином проходить налаштування спочатку пристроїв зв'язку і потім знаходження параметрів для ПІ-регулятора. Зроблені висновки стосовно застосування 3-імпульсної системи регулювання, яку модернізацію вона отримала на виробництві та доцільність її використання.

Ключові слова: парогенератор блоку ВВЕР-1000, витрата води, витрата пари, тиск, блок ВВЕР-1000.

M. YAROTSKYI

Odessa National Polytechnic University

OVERVIEW OF THE WATER LEVEL CONTROL SYSTEM OF THE VVER-1000 UNIT STEAM GENERATOR

The properties of the steam generator of the VVER-1000 unit are studied, the main characteristics of the object are deduced and the basic principles which will help to warn against mistakes in studying of this question are specified. The types of automatic control systems are presented and the main disadvantages of each of the control systems are studied. Based on the analysis, it was determined which automatic control system is the best for the steam generator. The process of finding the parameters of the regulator and the coefficients of communication devices for the steam flow channel, feed water flow and water level in the steam generator is explained. Most publications do not explain why the 3-pulse automatic control system is used, do not compare with other control systems, and simply cite the fact that the 3-pulse control system is used without explanations and subtleties of setting up the control system itself. No explanation is given regarding the setting of the controller for the 3-pulse automatic control system and why the coefficients of the communication devices are required. Therefore, the article explains why a 3-pulse automatic control system is used instead of a 2-pulse one, how to properly adjust the water level regulator and how to configure communication devices and why they are needed. The model of the steam generator in the Simulink environment is resulted and it is shown how adjustment of at first communication devices and then finding of parameters for PI-regulator passes. Conclusions are made regarding the application of the 3-pulse control system, what modernization it received in production and the expediency of its use.

Keywords: VVER-1000 unit steam generator, water flow rate, steam flow rate, pressure, VVER-1000 unit.

Вступ. Парогенератор є теплообмінником трубчатого типу, призначений для переробки тепла, що виробляється реактором, для приведення в рух турбіни. Через те, що реактор ВВЕР-1000 є двоконтурним, пар який генерується в парогенераторі залишається радіоактивно чистим. Парогенератор є важливим компонентом циркуляційної петлі першого контуру реактора ВВЕР-1000. Він розташований на кожній петлі першого контуру між корпусом реактора і головних циркуляційних насосів. Парогенератори діють як сполучна ланка між першим і другим контуром енергоблоку. Теплоносій першого контуру проходить по трубах парогенератора, де тепло передається в другий контур, створюючи суху насичену пару. Так як теплоносій першого контуру протікає по трубах, він ніколи не потрапляє і не змішується з середовищем другого контуру. Це дозволяє використовувати ядерне паливо, в той же час підтримуючи радіоактивну чистоту пара. Тому підтримка рівня води в парогенераторі являється одним з важливих аспектів роботи енергоблоку. Тому виникає завдання максимально дослідити системи автоматичного регулювання та розібрати чому саме ця автоматична система застосовується на такому важливому об'єкті.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Вивчаючи літературу яка наявна у відкритому доступі, завжди використовується трьохімпульсна автоматична система регулювання, але не наводиться аргументів чому саме дану систему регулювання треба використовувати. Немає детальних пояснень у налаштуванні даної автоматичної системи регулювання.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження являється огляд всієї теорії стосовно регулювання рівня води в парогенераторі блоку ВВЕР-1000, виведення детальної інформації стосовно регулювання рівня в парогенераторі та пояснення стосовно застосування саме даної автоматичної системи регулювання. Завдання які ставляться в даній темі прості, саме головне це внести необхідні пояснення стосовно застосування та налаштування 3-імпульсної автоматичної системи регулювання.

Методи і матеріали досліджень. Після короткого пояснення, перейдемо до теми публікації. А саме до вибору схеми і закону регулювання рівня води в парогенераторі блоку ВВЕР-1000. Регулювання живлення в парогенераторі зводиться до підтримки рівня живильної води в парогенераторі. Використання пропорційно-інтегрального (ПІ) закону регулювання для астатичного об'єкта з ефектом «набухання», не забезпечує потрібної якості регулювання. Так як інтегральний закон дає погану стійкість системи. Пропорційний закон не допустимий через статичну похибку регулювання. Тому для регулювання рівня в парогенераторі використовують комбіновану автоматичну систему регулювання (АСР). Регулювання по відхиленню з П-регулятором і контуром інваріантності по основному збуренню – витраті пари. Схема АСР з пристроєм вводу сигналу по витраті пари зображена на рис. 1.

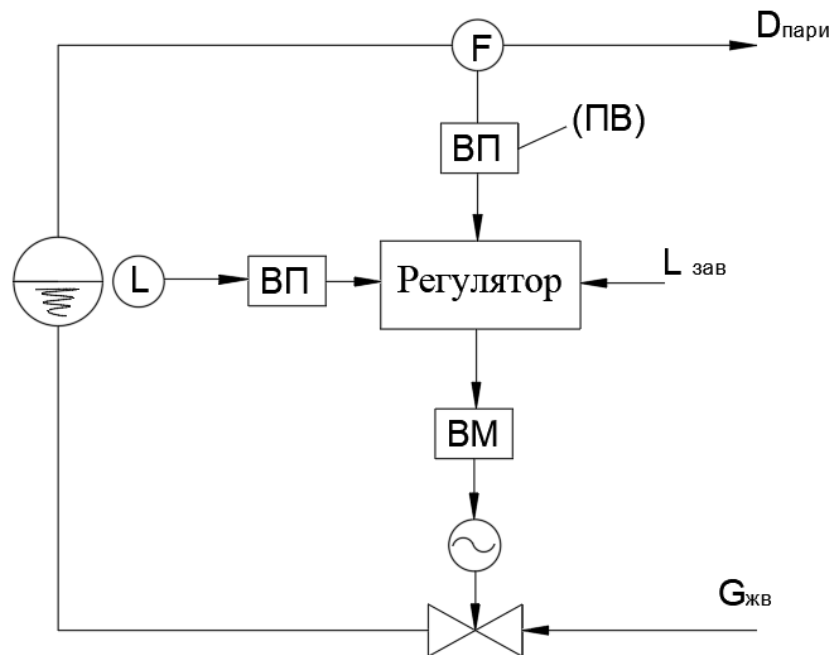


Рис. 1. Схема автоматичної системи регулювання з пристроєм вводу сигналу по витраті пари:
де ВП – вимірювальний перетворювач; ПВ – пристрій вводу сигналу по витраті пари; ВМ – виконуючий механізм

В цій АСР в регулятор заносяться сигнали по витраті пари та рівню води в парогенераторі. Регулятор зрівнюючи сигнали з завданням, наносить керуючий вплив на виконуючий механізм, в якості якого виступає регулюючий клапан живильної води.

Не дивлячись на приведення здавалось би адекватного прикладу АСР, у неї є свої недоліки які дозволяють її використовувати в промисловості.

Недоліки даної 2-імпульсної АСР наступні:

1. Витрата живильної води через регулюючий живильний клапан залежить не тільки від положення клапана, але і від перепаду тиску на даному клапані, адже в процесі експлуатації перепад тиску може змінюватися.

2. В дифманометрах-витратомірах минулих років виробництва, вихідний сигнал був пропорційний квадратному кореню з перепаду тиску.

Постає питання в модернізації АСР, адже дана не зможе забезпечити потрібної якості регулювання і може нанести непоправної шкоди як для об'єкта так і для всієї атомної станції. Тому вказані недоліки 2-контурної АСР можна виправити за допомогою введення в регулятор третього імпульсу по витраті живильної води від дифманометра-витратоміра. І це вже виходить, що схема буде 3-імпульсна. Насамперед треба пояснити в чому різниця 2- і 3-імпульсної системи відповідно. Різниця дуже проста. Адже якщо дивитися на прикладі який був приведений вище, 2-імпульсна система використовує сигнали з інформацією по витраті пари та по рівню води в парогенераторі, а вже 3-імпульсна система буде складатися з трьох сигналів: сигнали по витраті пари, рівню води в парогенераторі та витраті живильної води.

3-імпульсна АСР яка зображена на рис. 2.

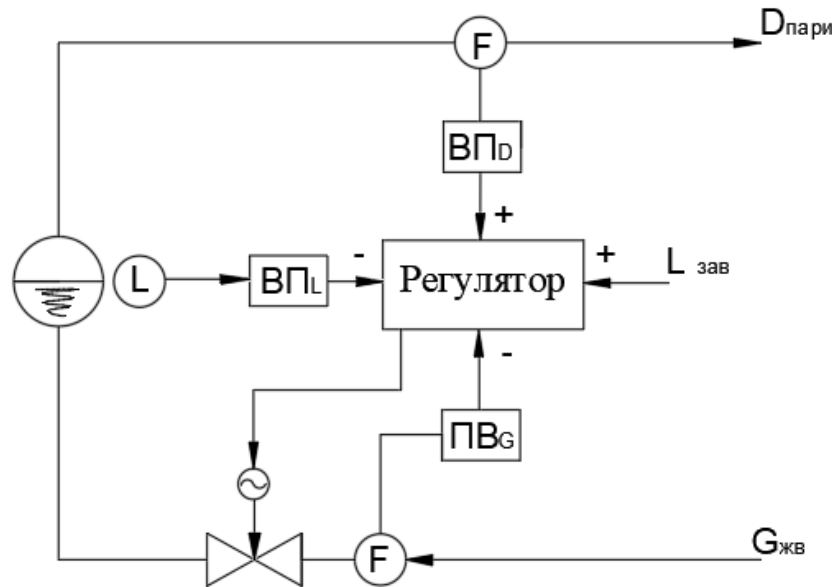


Рис. 2. Принципова схема 3-імпульсної автоматичної системи регулювання

Принцип роботи даної АСР в тому, що сигнали по витраті пари та витраті живильної води вводяться в регулятор з різними знаками. В сталому режимі ці сигнали рівні та протилежні за знаком і слідуючи з цього, компенсують один одного. А сигнал по рівню води компенсується сигналом завдання по рівню води. І тому дана АСР являється більш кращою з точки зору регулювання і тому використовується вже не один рік. Але хоч і виникають проблеми з тим, що при вимірюванні витрати пари, виникає перепад тиску пари який не критичний для ТЕС, але критичний для АЕС. Саме тому замість сигналу по витраті пари, використовують сигнал по різниці температур в гарячій і холодній нитці циркуляційного трубопроводу першого контуру. Але і в такому випадку виявилися недоліки, а саме при збільшенні електричної потужності змінювалась температура живильної води, яка і вносила похибку в розрахунок витрати пари. А також ще одним недоліком являється те, що при відключенні головного циркуляційного насоса виникає запізнення сигналу по витраті живильної води що приводить до збільшення рівня води в парогенераторі блоку. Але і для цих проблем знайшлися рішення. Була введена різниця по температурі живильної води в двох нитках. А для більш швидкого регулювання при зміні витрати пари, був введений сигнал по швидкості зміни тиску в паровому колекторі.

В середовищі Simulink детально буде показано як правильно будувати 3-х імпульсну автоматичну систему регулювання. На рис. 3 зображена модель парогенератора блоку ВВЕР-1000 в середовищі Simulink.

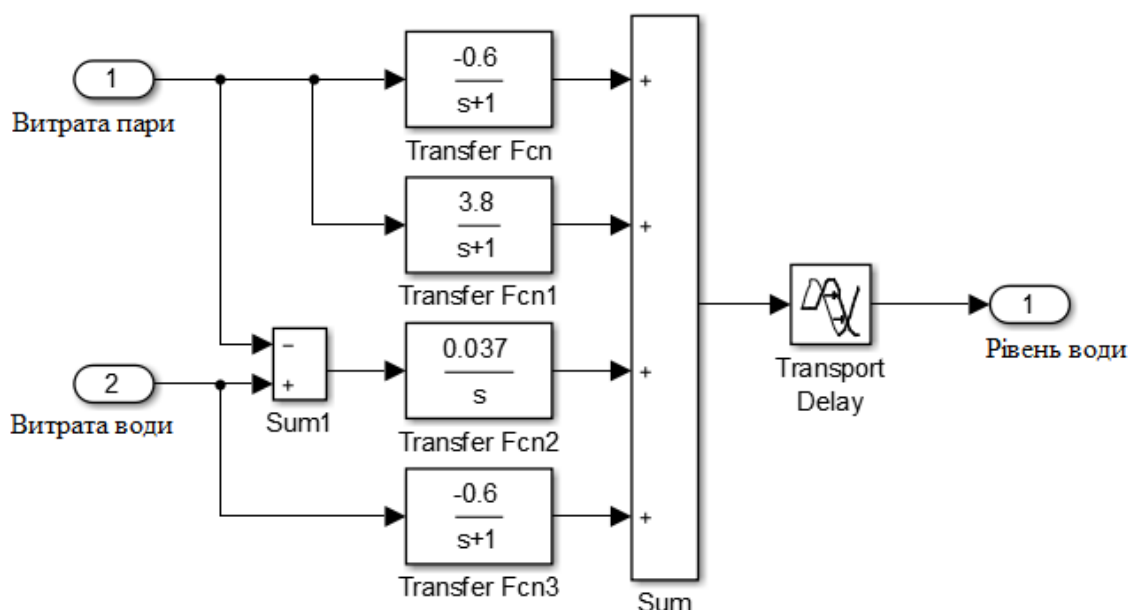


Рис. 3. Модель парогенератора в середовищі Simulink

Представлена модель парогенератора спрощена, так як має два входи а саме: канал по витраті живильної води та канал по витраті пари. Дана модель і буде застосована для побудови 3-імпульсної автоматичної системи регулювання. Для початку треба знайти коефіцієнти приладів зв'язку, для цього потрібно подати збурення по каналу витрати води. Отримана крива розгону обробляється і від неї отримуються коефіцієнти приладів зв'язку по каналу витрати води та витрати пари. Дані коефіцієнти являють собою коефіцієнти передачі дифманометра рівнеміру, витрати пари та витрати води. Для рівнеміру коефіцієнт буде рівний 1. Знайшовши необхідні коефіцієнти, необхідно знайти параметри ПІ-регулятора. Для цього знову знімаємо криву розгону зі збуренням по витраті води помножений на коефіцієнт приладу зв'язку і отримаємо нову криву розгону, з якої і будуть знайдені параметри для регулятора рівня води парогенератора блоку ВВЕР-1000. Загальна структура 3-імпульсної автоматичної системи регулювання в середовищі Simulink зображена на рис. 4.

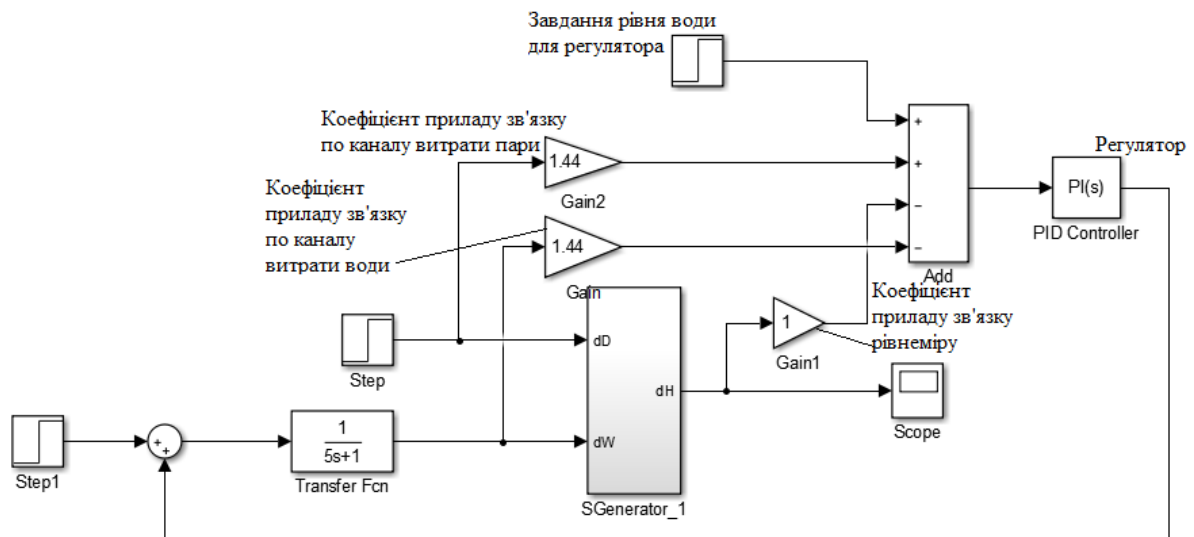


Рис. 4. Трьохімпульсна автоматична система регулювання в середовищі Simulink

Коефіцієнти приладів зв'язку край необхідні, адже без них не буде працювати система регулювання. Результати регулювання рівня води приведені на рис. 5 та 6.

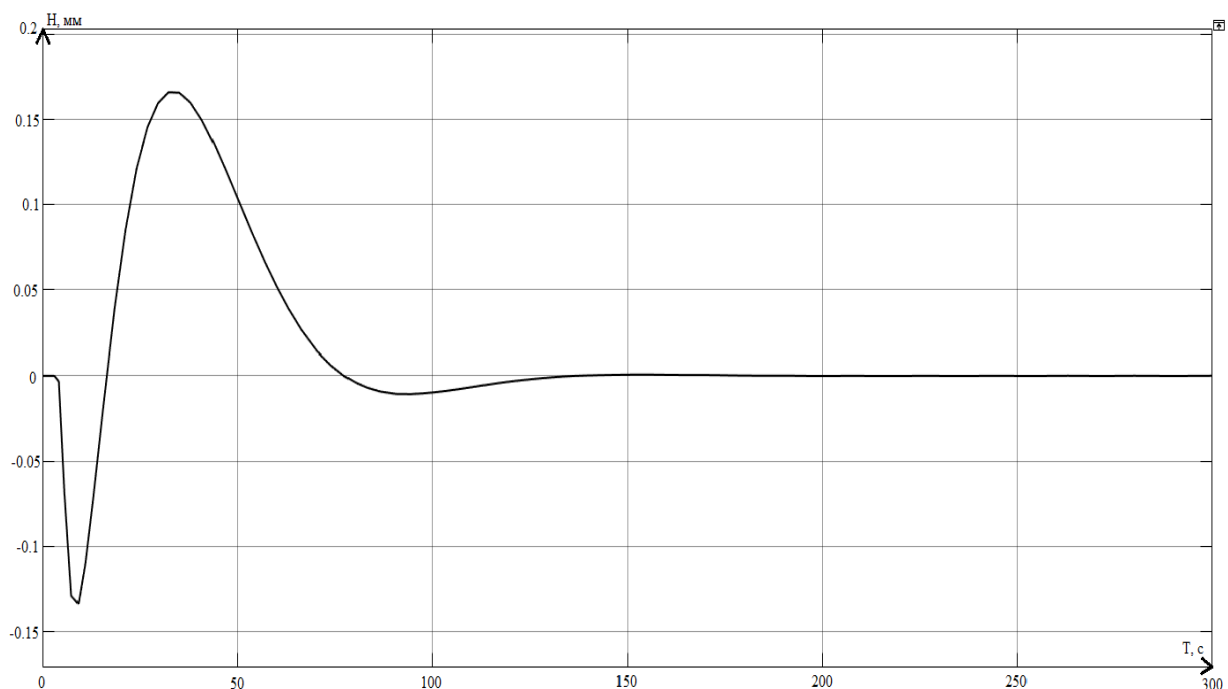


Рис. 5. Регулювання рівня води в парогенераторі при збуренні по витраті живильної води в середовищі Simulink

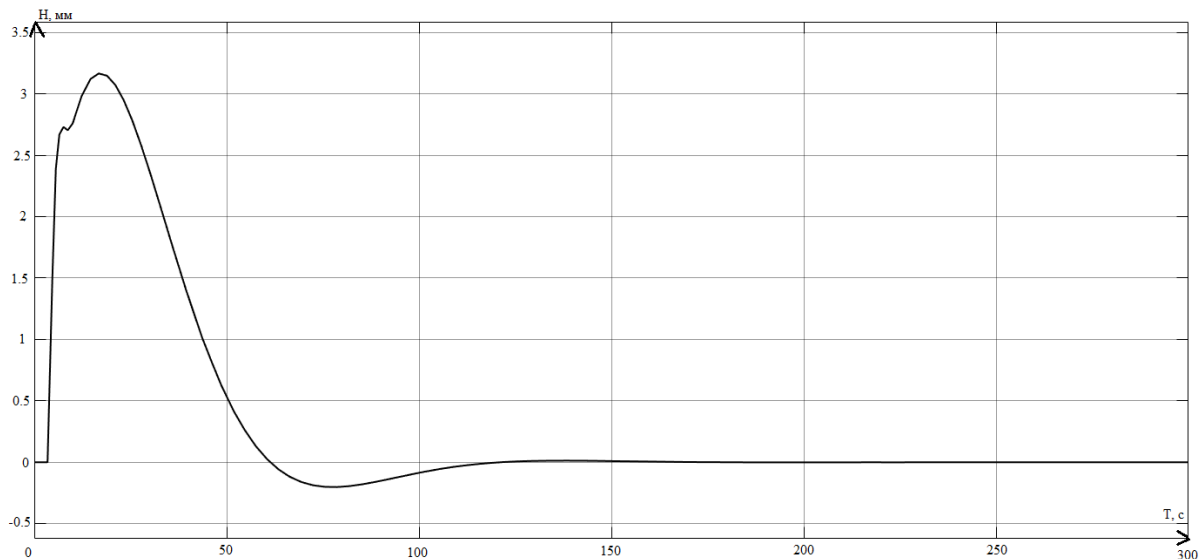


Рис. 6. Регулювання рівня води в парогенераторі при збуренні по витраті пари в середовищі Simulink

Результати досліджень та їх обговорення. Результатом розгляду даної теми, був детальний розбір побудови 3-імпульсної автоматичної системи регулювання та розглянуто її застосування в середовищі Simulink. Дана система регулювання показала себе якнайкраще з точки зору регулювання рівня води парогенератора блоку ВВЕР-1000. Відхилення рівня води в динаміці не перевищують критичних значень і тому дана система регулювання добре виконує свою роботу. Були також вказані необхідні параметри, без котрих дана система регулювання не змогла би працювати.

Висновки. Виконуючи дослідження даного питання, можна зробити наступні висновки: регулювання живлення парогенератора блоку ВВЕР-1000 зводиться до підтримки рівня води в парогенераторі. Це підтримка балансу між живленням парогенератора живильною водою та витратою пари. Тому більш ефективно буде використовувати саме 3-імпульсну автоматичну систему регулювання. На реальній атомній електростанції 3-імпульсна система регулювання була дещо доповнена, з деякими поправками на те, що сигнал по витраті пари буде замінюватись іншими сигналами які і допоможуть дотримуватись балансу між витратою води і витратою пари в парогенераторі. В середовищі Simulink 3-імпульсна система регулювання добре себе зарекомендувала і тому саме вона застосовується на даний момент на реальному об'єкті. Треба не забувати також про нюанси з якими можливо зустрінеться при побудові системи регулювання в середовищі Simulink, адже якщо не дотримуватись даних рекомендацій, система регулювання не буде працювати з достатньою ефективністю та буде збільшуватись час регулювання.

References

1. V.A. Demchenko, Automatic control systems and technological processes NPP and TPS. Odesa: Astroprint, 2001, 305 p.
2. G. T. Kulakov et al., "Matematicheskoe modelirovanie perekhodnyh processov trekhimpul'snoj sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya pitaniya vodoj parogeneratora na sbros nagruzki," Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS, no. 1, pp. 57-64, 2014.
3. V.S. Mihajlenko et al., "Sintez nejromerezhevoj sistemi avtomatichnogo reguljuvannya rivnya vodi v barabani kotla energobloku TES," Scientific news of NTUU "KPI", no. 5, pp. 45-51, 2012.
4. N.V. ZHukova et al., "Issledovanie SAR urovnya vody v PG," Donetsk National Technical University, no. 1, pp. 8-10, 2011.

УДК 681.5.03

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-67-1-5

ГОСТИЩЕВ В. О.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО НАГРІВНОГО КОЛОДЯЗЯ

Проведена детальна робота по вивченню властивостей такого об'єкта як рекуперативний нагрівний колодязь. Були виявлені основні аспекти роботи даної установки та було чітко розібрано математичну модель, для якої також були знайдені налаштування для ПІ-регулятора. Дана робота була проведена так як сам об'єкт представляє собою складну систему яка потребує більш детального вивчення. Були вивчені загальні фізичні властивості які використовуються для роботи установки, а також проведена детальна робота по розробці математичної моделі та застосуванні її для знаходження оптимальних шляхів керування рекуперативним нагрівним колодязем. Представлена загальна модель яка допоможе зрозуміти, які керуючі впливи можливі на даній установці та як ці впливи не несли за собою подій, які б могли спричинити аварію. Детально досліджено математичну модель, а також проведена велика робота по деталізації даної моделі, включені всі можливі фактори. Всі можливі керуючі впливи та збурення відображені в даній роботі для більш детального вивчення об'єкта. Були виділені основні аспекти, яких потрібно дотримуватись при розробці та застосуванні автоматичної системи керування. Детально вивчено математичну модель, всі необхідні параметри для побудови математичної моделі. Параметри для побудови математичної моделі були відображені в параметричній схемі яка і лягла за основу створення математичної моделі для рекуперативного нагрівного колодязя. Були розглянуті основні аспекти при побудові автоматичної системи керування та виведені основні правила, за якими можливо було б розробити стійку систему керування. Також розглянуті види регуляторів, які саме і можливо застосовувати на об'єктах даного типу та виведені основні недоліки застосування на даній автоматичній системі керування інших регуляторів. Досліджений як сам об'єкт так і застосування на даному об'єкті необхідних систем регулювання які допоможуть більш якісно виконувати необхідні процеси.

Ключові слова: рекуперативний колодязь, нагрівальний колодязь, математична модель, рекуператор, нагрівання.

V. GOSTISHCHEV

Odessa National Polytechnic University

AUTOMATIC SYSTEM OF REGULATION OF A RECUPERATIVE HEATING WELL

Detailed work has been done to study the properties of such an object as a recuperative heating well. The main aspects of the operation of this installation were identified and the mathematical model was clearly analyzed, for which settings for the PI controller were also found. This work was carried out because the object itself is a complex system that requires more detailed study. The general physical properties used for the operation of the installation were studied, as well as detailed work on the development of a mathematical model and its application to find optimal ways to control a recuperative heating well. A general model is presented to help understand what control effects are possible on a given installation and how these effects did not lead to events that could cause an accident. The mathematical model is investigated in detail, and also the big work on detailing of this model is carried out, all possible factors are included. All possible control effects and perturbations are reflected in this paper for a more detailed study of the object. A more detailed study of both the object and the mathematical model will allow to reveal more the properties of the installation and will not miss a single detail that could interfere with the process of detailed analysis of the installation. This work is aimed at revealing the basic essence of the installation, its physical properties and properties as an object of control. Since the installation itself is generally a difficult system that requires detailed study. That is why the recuperative heating well was studied in detail and disassembled into the main parts, which were used to make a detailed mathematical model that includes all the necessary characteristics that will solve problems related to automatic control. An automatic control system was built, which would have the greatest impact on the perturbations that would come to the object. Thus, we have the following in general: we have a mathematical model that can be used for a more detailed study of the control properties of this installation. Also available is a researched certain control model which is used in this work and demonstrated.

Keywords: recuperative well, heating well, mathematical model, recuperator, heating.

Постановка проблеми. Проблема полягає у тому, що дана установка являє собою складну систему, яка потребує детального вивчення. І тільки таким чином, після того як рекуперативний нагрівний колодязь буде детально розібраний на деталі, вже можна описувати даний об'єкт у вигляді математичної моделі та втілення цієї моделі в програмне середовище. Це вже дозволить вивчити більш детально об'єкт. І саме тому, вся робота направлена на те, щоби після детального вивчення загальних властивостей, рекуперативний нагрівний колодязь був розглянутий як об'єкт керування. І так як було сказано, що рекуперативний нагрівний колодязь являє собою складний об'єкт, саме знаходження основних показників стабільності керування дасть нам основний результат який допоможе більше знати про дану установку як про об'єкт керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій показав, що сам об'єкт вже більш детально вивчений. Перш за все йдеться про фізичні процеси які проходять в рекуперативному нагрівному колодязі та про принцип роботи самої установки. Але з точки зору керування даним об'єктом, вдалось знайти не так багато інформації.

Більшість джерел вже застаріли, тому дані знання потребують оновлення. В загалом більшість джерел описує більш-менш детально саму установку, але з точки зору керування даним об'єктом представлено й не так багато літератури яка б допомогла зрозуміти всі аспекти в керуванні установкою. Були вивчені публікації наступних авторів: Сульников, Зайченко, Світличний та ін.

Постановка завдання. Розробити автоматичну систему регулювання рекуперативного нагрівного колодязя.

Виклад основного матеріалу. Спершу треба пояснити, що являє собою рекуперативний нагрівний колодязь.

Зливки металу, отримані з виливниць, перед прокаткою їх на блюмінгу або слябінгу нагрівають у нагрівальних колодязях. Нагрівальні колодязі – це основний тип нагрівальних пристроїв, що встановлюються перед обтискними станами (блюмінгами і слябінгами), на яких зазвичай прокочують зливки вагою не менш 2–3 т і товщиною 350–400 мм і більше. Розповсюджені колодязі різних конструкцій, що працюють з регенеративним принципом підігріву газу та повітря або з рекуперативним принципом підігріву повітря.

Нагрівальні колодязі опалюють доменним (регенеративні) або змішані (регенеративні, рекуперативні) газом, з теплою згоряння до 8,4–10,0 МДж/м³. Крім того, у суміші використовують і природний газ. Калорійність газу для рекуперативних колодязів вище, ніж для регенеративних. Змішаний газ для колодязів надходить зі спеціальних газозмішувачів станцій. Колодязі на деяких заводах опалюють мазутом.

На рис. 1 показана схема комірки рекуперативного колодязя з пальником в центрі подіни.

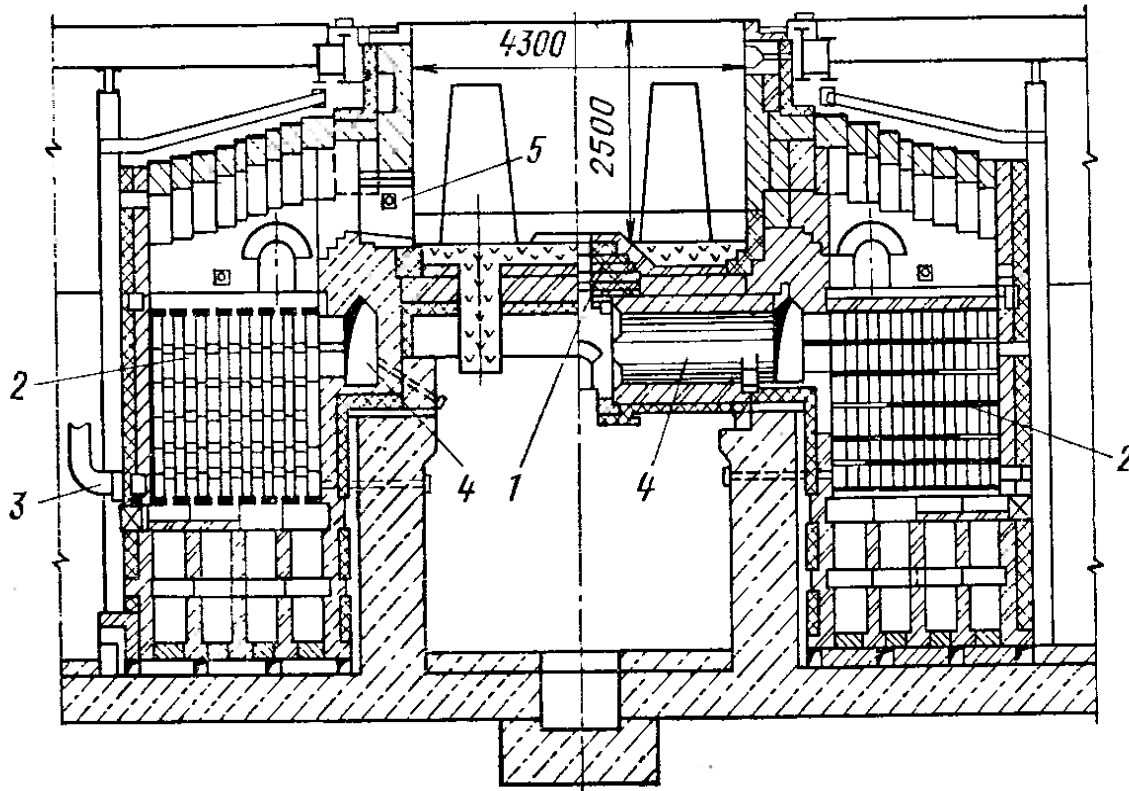


Рис. 1. Рекуперативний колодязь:

1 – пальник; 2 – керамічний рекуператор; 3 – підведення холодного повітря; 4 – канал для підведення гарячого повітря; 5 – канали для відводу диму; 6 – злитки; 7 – шлакова чаша; 8 – димові канали для відведення "свого" диму; 9 – димові канали для відведення "транзитного" диму сусідньої комірки

Основні вихідні величини, що характеризують тепловий режим роботи нагрівального колодязя: температура в робочому просторі колодязя, економічність спалювання палива, тиск в робочому просторі колодязя.

Основними входними, керуючими впливами при нагріванні є: зміна теплового навантаження (витрата палива) і співвідношення між витратами палива і повітря; зміна тяги димової труби (або димососа).

Тепер після того, як вже був описаний сам об'єкт, то перейдемо до розробки математичної моделі. В якості об'єкта управління розглядаються контури регулювання температури димових газів, економічності процесу горіння і розрідження в комірці рекуперативного нагрівного колодязя. Параметрична схема об'єкта наведена на рис. 2.

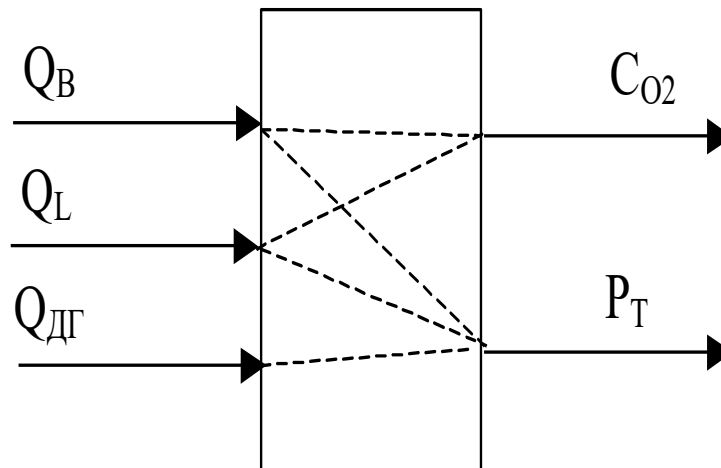


Рис. 2. Параметрична схема об'єкта управління

Основним збуджуючим впливом є посад металевих злитків. Для підтримання температури всередині необхідно змінювати витрату палива Q_B . Для забезпечення заданої концентрації кисню в димових газах C_{O2} підтримують необхідну витрату повітря, що йде на горіння Q_L .

Коливання витрат палива і повітря призводять до змін розрідження в топці P_T . Заданий розрідження підтримують з допомогою зміни витрати димових газів $Q_{дг}$.

Математична модель об'єкта розглядається окремо для кожного регульованого параметра. Математична модель у вигляді матриці передавальних функцій представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Матриця передавальних функцій об'єкта

	$u1, \%$	$u2, \% \text{ газ}$
y_1 1050+20 °C	-----	$\frac{1}{35p + 1} e^{-3p}$
y_2 , 5+0.5 мм H ₂ O	$\frac{0.06}{2.2p + 1} e^{-0.7p}$	$\frac{0.04}{5.8p + 1} e^{-2p}$

В таблиці 1, y_1, y_2 – керуючі змінні (виміри), $u1, u2$ – керуючі впливи, час в секундах.

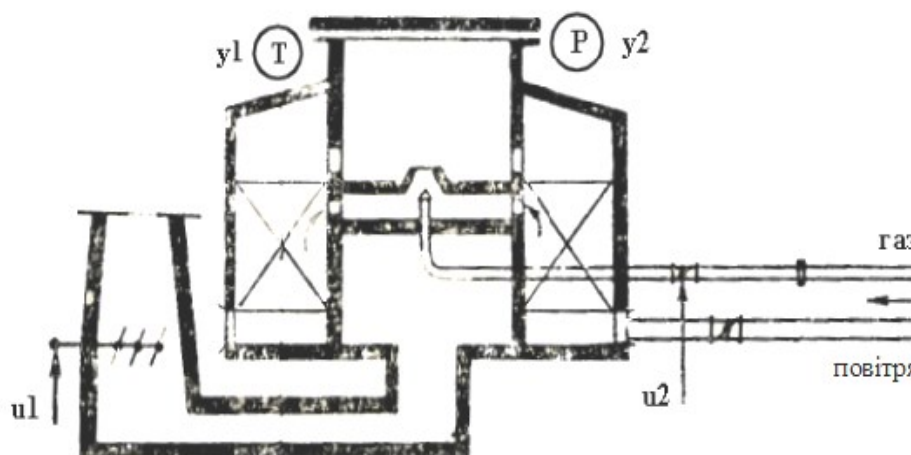


Рис. 3. Принципова схема рекуперативного колодязя

Джерело: розробка автора

На рис. 4 наведена структурна схема моделі рекуперативного колодязя.

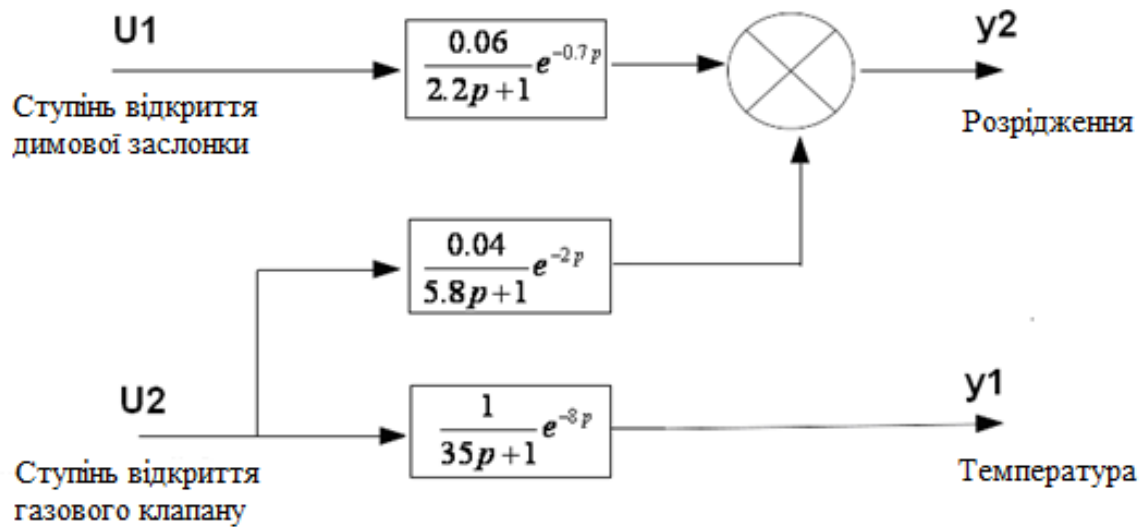


Рис. 4. Структурна схема моделі рекуперативного колодязя

Об'єкт, який автоматизується, являється складною динамічною системою, що має дві величини, що регулюються, й два впливи керування.

Загальною особливістю всіх розглянутих каналів являється наявність часу запізнення τ .

В загальному вигляді динамічні властивості об'єкта описані передатною функцією інерційної ланки 1-го порядку із запізненням:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p}$$

В результаті ми отримуємо сукупність підсистем, що мають тільки один вхід і один вихід. Для об'єднання отриманих підсистем в одну загальну систему можна використати блок-схему, замінив передатні функції структурними схемами в вигляді змінних стану. Розвернута схема системи з урахуванням запізнення представлена на рис. 5.

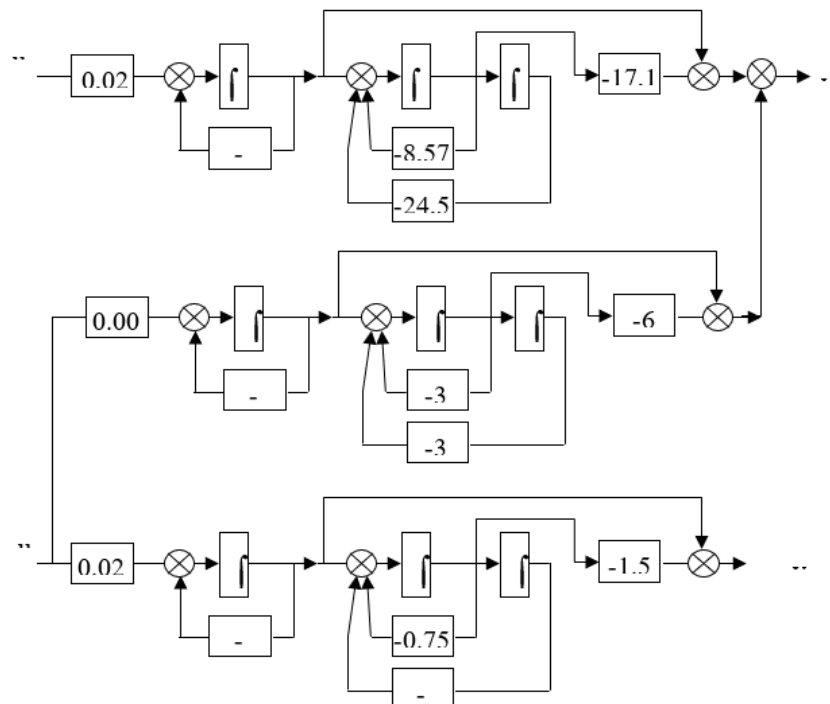


Рис. 5. Структурна схема моделі об'єкта автоматизації

Отримавши математичну модель і дослідивши, які вхідні параметри ми контролюємо, можна перейти до моделювання самих процесів на даній установці, які в майбутньому допоможуть знайти необхідні параметри для регуляторів.

В результаті вийшли наступні розгінні характеристики, які зображені на рис. 6–8.

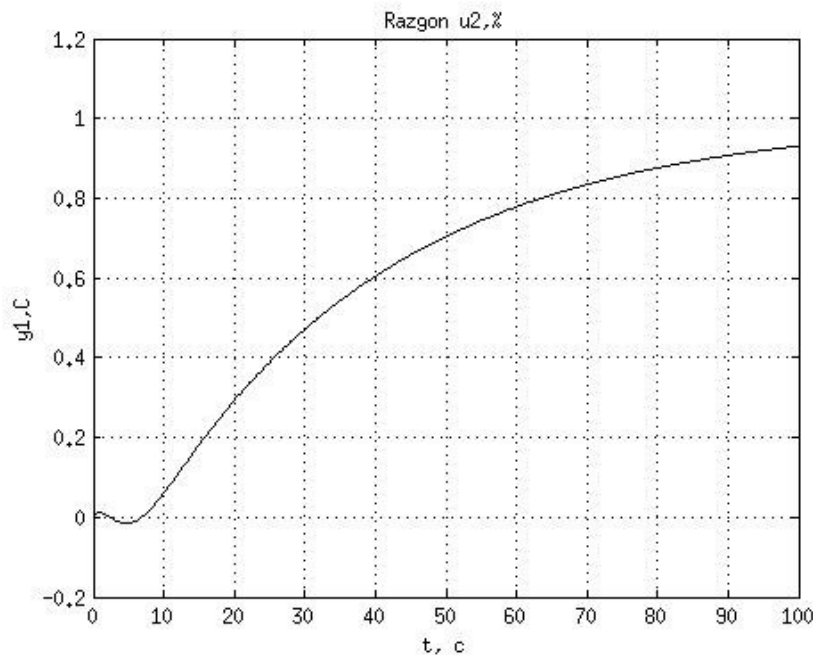


Рис. 6. Розгінні характеристики системи при збуренні витратою газу

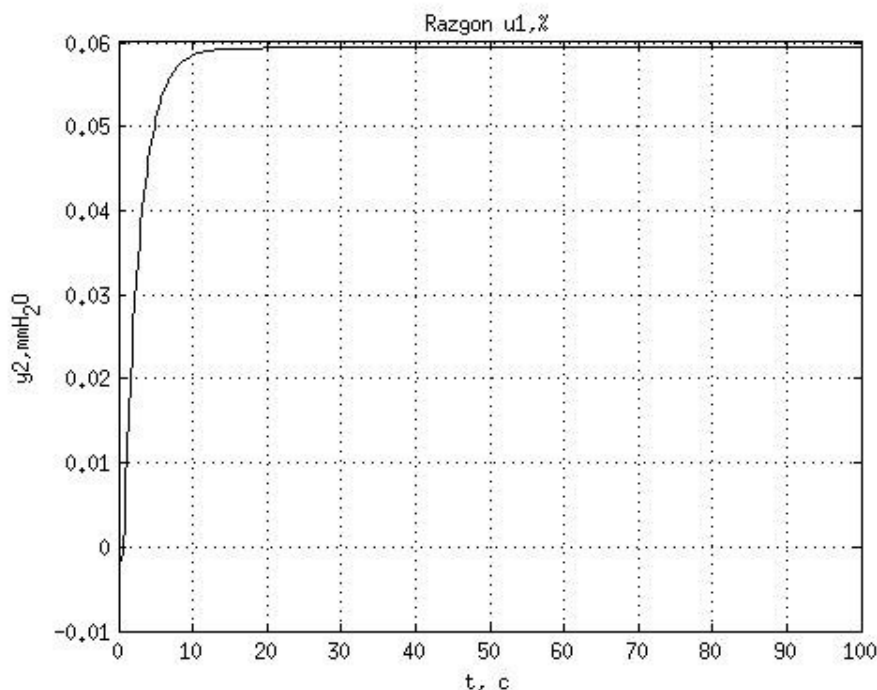


Рис. 7. Розгінні характеристики системи при збуренні витратою димових газів

Проаналізувавши перехідні процеси можна зробити висновок, що значення регульованих параметрів не перебільшують допустимих. Перетворення моделі регулятора у форму, що відповідає її реалізації у програмному забезпеченні.

В результаті виконання програмного коду будуть отримані перехідні процеси зміни при збуреннях, які поступають на кожен із каналів регулювання та перехідні процеси на виході системи.

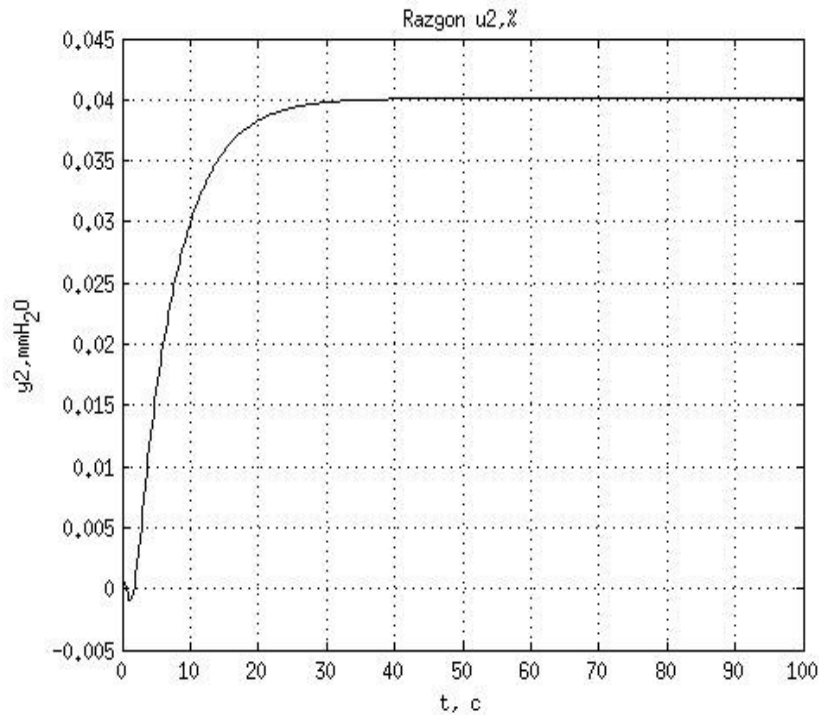


Рис. 8. Розгінні характеристики системи при збуренні витратою димових газів

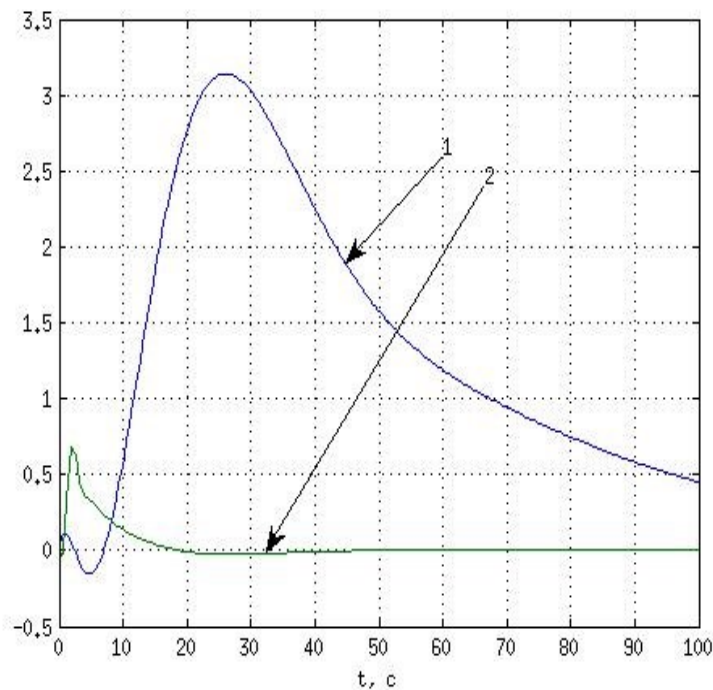


Рис. 9. Перехідні процеси замкнутої системи:
1 – відхилення температури, С; 2 – відхилення тиску

Висновки. У статті розглянутий рекуперативний нагрівний колодязь. Так як ця установка є складним об'єктом, тому були повністю розглянуті її властивості та відображення цих властивостей у математичній моделі, яка повністю описує необхідні параметри об'єкта, і які відображені в цій роботі. Також, завдяки розробленій математичній моделі та за допомогою програмного забезпечення, знайдені необхідні параметри для регулятора рекуперативного нагрівного колодязя. Розглянута більш нова модель цієї установки, яка дозволить в майбутньому краще її вивчати та знаходити нові методи у процесі керування цим об'єктом.

References

1. Kryvandyn V.A. Fylymonov Yu.P. Teoriya konstruksyy y raschety metallurhicheskyykh pechei. Tom 1. 2-e yzdanye. 1986, 320 s.
2. Boiko V.Y., Smoliak V.A. Avtomatyzirovannyye systemy upravleniya tekhnolohicheskym protsessamy v chernoi metallurhyi. Uchebnoe posobyie dlia studentov vuzov po spetsyalnostiam "Elektronnyye systemy" y "Avtomatyzatsiya tekhnolohicheskyykh protsessov y proyzvodstv". Dneprodzerzhynsk, 1997, 260 s.
3. Pletnev H.P., Zaichenko Yu.P., Zverev E.A., Kyselev Yu.E. Proektyrovanye, montazh y ekspluatatsiya avtomatyzirovannykh system upravleniya teploenerheticheskymy protsessamy. Moskva: Yzdatelstvo MЭУ, 1995, 316 s.

УДК 621.396.963

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-6

ЯНОВИЦЬКИЙ О. С., ГОРЯЩЕНКО К. Л., ЦЮРПІТА Ю. С., СВАЧІЙ О. І.
Хмельницький національний університет

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ БАРОМЕТРИЧНОГО ТИСКУ НА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ

У статті розглядається метод вимірювання барометричного тиску на безпілотних літальних апаратах для автоматичного визначення висоти. Вимірювання здійснюються за допомогою методу нівелювання та розрахункових формул Лапласа та Бабіне. Робота направлена на автоматичне визначення висоти БПЛА за допомогою зняття показів барометричного тиску, збір та передачу даних на пульт оператора безпілотного літального апарату. Створено програму яка зчитує певну вибірку значень та усереднює покази атмосферного тиску після чого обраховує значення висоти. Детально і поетапно описано програмний код, приведено блок-схеми.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, барометр, барометричний тиск, автоматичне визначення висоти, метод нівелювання, формула Лапласа, формула Бабіне, частота дискретизації, мікроконтролер, передавач.

A. YANOVITSKYI, K. GORIASCHENKO, Y. TSURPITA, O. SVACHII
Khmelnytskyi National University

METHOD OF MEASUREMENT OF BAROMETRIC PRESSURE ON UNMANNED AIRCRAFT FOR AUTOMATIC HEIGHT DETERMINATION

The use of unmanned aerial vehicles is becoming increasingly popular in the actions of rescue teams. The most commonly used unmanned aerial vehicles are multicopters capable of vertical takeoff and hovering, as well as aircraft or motor gliders that take off from a place or a special catapult. The choice of the appropriate type of UAV entails taking into account certain advantages and disadvantages. The main disadvantage of multi-propeller aircraft is their longevity, as a rule, it is in the range from 1 to 60 minutes, depending on battery capacity. On the other hand, the main advantage of multi-propeller aircraft is their maneuverability, which in combination with their equipment with a special camera can significantly reduce the impact of terrain conditions when using UAVs for search activities.

It is worth noting that UAVs have always been an achievement of military technology, but recently such representatives of drones as quadcopters, are gaining their place in various spheres of civilian life. Drones predict the fate of mobile phones, that is, in the near future they may become an indispensable attribute of our lives. This is due to the relatively low cost of these devices, ease of operation, low operating and maintenance costs.

The report discusses the method of measuring barometric pressure on unmanned aerial vehicles for automatic altitude determination. Measurements are performed using the leveling method and Laplace and Babine calculation formulas. The work is aimed at automatically determining the height of the UAV by taking barometric pressure readings, collecting and transmitting data to the operator's panel of the unmanned aerial vehicle. A program has been created that reads a certain sample of values and averages the atmospheric pressure readings and then calculates the altitude values. The program code is described in detail and step by step, block diagrams are given.

Key words: unmanned aerial vehicles, barometer, barometric pressure, automatic altitude determination, leveling method, Laplace formula, Babine formula, sampling rate, microcontroller, transmitter.

Вступ. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), на даний час є найбільш інноваційним елементом, що використовується в різноманітних промислових секторах. Темпи розвитку цієї сфери наздоганяють зростання сфери інформаційних технологій. [1]

БПЛА можуть використовуватися в різних видах діяльності як державного і приватного сектора, таких як:

- державна сфера: військові, прикордонники або служби, які надають допомогу у разі стихійних лих;
- підприємницька сфера: моніторинг та обслуговування будівель, технологічний супровід тваринних комплексів, ферм, аграрного бізнесу, геологічні відкриття або аерофотозйомка;
- сфера обслуговування: доставка товарів, ігри, реклама.

Використання безпілотних літальних апаратів стає все більш популярним в діях рятувальних загонів. Найбільш часто використовувані безпілотні літальні апарати – це мультикоптер, здатні до вертикального зльоту і зависання, а також літаки або моторні планери, злітають з місця або спеціальної катапульты. Вибір відповідного типу БПЛА тягне за собою врахування певних переваг і недоліків. Основним недоліком багатогвинтових літаків є їх довготривалість польоту, як правило, вона знаходиться в діапазоні від 1 до 60 хв залежно від ємності батареї. З іншого боку, основною перевагою багатогвинтових літаків є їх маневреність, яка в поєднанні з їх оснащенням спеціальною камерою може значно знизити вплив умов місцевості при використанні БПЛА для пошукової діяльності.

Варто зазначити, що БПЛА завжди були досягненням військових технологій, проте останнім часом такі їх представники безпілотників, як квадрокоптер, завоюють своє місце ще й у різних сферах цивільного

життя. Дронам пророкують долю мобільних телефонів, тобто в недалекому майбутньому вони можуть стати незамінним атрибутом нашого життя. Це пояснюється, порівняно невеликою вартістю даних пристроїв, простотою керування, малими витратами на експлуатацію та обслуговування.

На сьогодні можна перелічити безліч прикладів використання БПЛА, нижче наведені основні:

1. Картографія.

Сьогодні широко використовують невеликі, легкі безпілотники, які завдяки спеціальному програмному забезпеченню можуть досліджувати природні та міські ландшафти, промислові карти, створюючи не тільки фото, а й тисячі цифрових зображень, які об'єднуються у 3D-моделі.

2. Захист дикої природи.

Уряд США, Малайзії та Індонезії вже використовує БПЛА для захисту своїх земель та тварин що їх населяють. Так, за допомогою повітряних зйомок проводяться заходи по збереженню рідкісних диких тварин, вивчається їх розподіл та щільність на певній території. Використання БПЛА є дієвішим способом моніторингу у густих лісах адже наземні способи спостереження є дорогими та мають менший результат. У деяк національних парках світу використання безпілотників зменшує таке негативні явище, як браконьерство.

3. БПЛА в аграрній справі.

Ефективне землеробство неможливе без знання точної площі полів. Більш того, відомостей про стан рослин і ґрунтів є також дуже важливі. Аерозйомка з повітря - це найбільш дієвий метод для отримання таких даних. Кілька хвилин польоту на невеликій контролюємій висоті дозволять отримати детальні карти сантиметрової точності і 3D-моделі рельєфу. З допомогою БПЛА можна виконувати інвентаризацію та моніторинг земель, проводити точні агрохімічні дослідження і контролювати стан рослин.

4. Безпілотні літальні апарати у рятувальних цілях.

Дрони, що обладнанні спеціальними інфрачервоними датчиками дають можливість виявляти людей, Які попали у полон пожежі, автоаварії, завали будівель, снігових лавин та других катастроф як природного, так и техногенного характеру, коли людські ресурси не можуть зібрати потрібну інформацію про тих, кого ще можна врятувати.

Все перелічене не можливе без оцінки висоти БПЛА, адже це надзвичайно важлива інформація при виконанні таких маневрів польоту, як посадка, зліт, політ на малій висоті і т.д. Найпоширенішим пристроєм вимірювання висоти, що присутній практично в будь-якій бортовій системі, є барометр. Найважливішою характеристикою цього приладу є те, що він вимірює висоту (above middle sea level) AMSL, а не (Above Ground Level) AGL. Це означає, що висоту над рівнем моря необхідно оцінювати, використовуючи висоту зльоту.

Також одним з способів оцінки висоти може бути GPS. Однак стандартний GPS має вертикальну точність від 25 до 50 метрів та при передачі в міському середовищі чутливий до перешкод. Незважаючи на те, що він підходить для польотів на великій висоті, для будь-яких операцій на малих висотах, даний метод є не ефективним та створюється необхідність використання датчику, який може вимірювати висоту AGL з похибкою близько метра або менше. Для вирішення цього завдання були розроблені візуальні методи дослідження та оцінки висоти, для досягнення цієї мети використовують камери та методи машинного навчання.

Найбільш широко вживані в комерційних цілях методи – це оптичні методи, методи на основі радіолокаційних станцій, що пов'язано з їх простотою і надійністю. Оскільки вони не вимагають високої обчислювальної потужності і з меншою ймовірністю генерують артефакти (в порівнянні з методами комп'ютерного зору), ці системи використовуються в безлічі БПЛА. Радіолокаційні альтиметри часто використовують у об'єднанні з технологією GPS, для визначення висоти виключно при взльоті та посадці.

Функція Altitude Hold Mode (автоматичне утримання висоти) присутня в багатьох моделях, вона корисна при проведенні аерофото зйомок, та також стане в нагоді і починаючому оператору БПЛА.

Завдяки спеціальним датчикам, встановленим на безпілотні літальні апарати вони легко утримують сталу висоту над землею, навіть якщо пілот відпускає пульт керування.

Для професійних операторів – це можливість зосередитися на зйомці, а для новачків – справжня знахідка, адже в такому режимі знижується аварійність ситуацій, і як наслідок – значна економія на ремонті та усуненні дрібних поломок. В цьому режимі пілот керує нахилами вправо/вліво, не змінюючи висоти польоту. Якщо з'являється потреба змінити висоту, тоді використовуються команди джойстика пульта оператора що відповідають за дану команду.

Найбільш часто моделі БПЛА оснащені цифровими барометричними датчиками (барометрами). [2] Принцип роботи таких моделей досить простий: зі збільшенням висоти, атмосферний тиск падає, а значить, польотний контролер реагує відповідним чином і подає необхідні сигнали на двигуни, регулюючи потужність моторів.

Однак не у всіх випадках система працює коректно, оскільки на невеликій відстані від землі, різниця тиску практично не відчутна, а тому барометр може давати збій на малих висотах.

При необхідності відносно великої точності на висоті 8–10 м, використовують ультразвук. Ультразвукові датчики часто застосовують в селфі-дронах, головна функція яких – фото, на невеликих висотах і навіть у приміщенні. Але такі датчики теж можуть дати збій, якщо польоти проводяться у приміщенні зі звукоізоляцією.

Наступний вид сенсорів для активації режиму утримання висоти – детектори візуального позиціонування. По суті – це спеціальна відеокамера, яка в онлайн-режимі знімає і постійно моніторить поверхню, над якою зависає дрон. Такий принцип часто використовується в більш дорогих моделях від відомих виробників. Нажаль, ця система також може дати збій, у випадках коли поверхня під коптером занадто яскраво освітлена, або навпаки, дуже темна.

Дорожчі моделі мають в своєму списку переваг GPS приймачі – обладнання останнього покоління, яке використовує дані супутникових навігаційних систем.

Основна частина. Для перетворення даних тиску, що видає датчик, у даній статті описується метод барометричного нівелювання [3].

Метод передбачає у собі визначення різниці висот між двома точками простору за допомогою різниці тиску між ними. Атмосферний тиск окрім висоти над рівнем моря також залежить від інших чинників, таких як:

- вологість повітря, e ;
- температура, t ;
- широта, φ .

Дані чинники можна врахувати в формулі Лапласа (1).

$$h = 18401,2(1 + 0,00366t) \left(1 + 0,378 \frac{e}{p_0} \right) (1 + 0,0026 \cos 2\varphi) (1 + \beta h) \lg \frac{p_0}{p_h} \quad (1)$$

де φ – широта місця виміру тиску;

e – абсолютна вологість повітря;

t – температура повітря;

p_0 – значення тиску в першій точці;

p_h – значення тиску в другій точці.

У цій статті описується простіша формула (2), яка з усіх чинників враховує тільки температуру. Дану формулу (2) було вибрано через можливість з її допомогою зменшення часу обчислення. Врахування тільки температури не є критичним фактором обрахунку висоти, адже час та дальність польоту безпілотної не настільки великі, щоб в період польоту накопилася велика похибка.

Формулу (2) називають формулою Бабіне

$$h = 8000 \frac{2(p_0 - p_h)}{p_0 + p_h} (1 + \alpha t) \quad (2)$$

де α – коефіцієнт розширення газів.

В період без комп'ютерів, дані обрахунку були досить складними та займали час, тому були створені допоміжні таблиці барометричних ступенів.

Барометрична ступінь – зміна висоти, при якій тиск знижується на 1 мм рт. ст.

Для побудови таких таблиці використовують спрощену формулу Бабіне (3):

$$h = 8000 \frac{(1 + \alpha t)}{p} \quad (3)$$

Керуючий мікроконтролер відправляє послідовність команд для запуску початку вимірювання тиску або температури. Після перетворення АЦП датчика, значення результату можна прочитати через інтерфейс I2C. Для розрахунку температури в °C та тиску в гПа слід використовувати дані калібрування. Ці дані можна прочитати з BMP085 EEPROM через I2C інтерфейс за допомогою програмного забезпечення.

Частоту дискретизації можна збільшити до 128 разів на секунду (стандартний режим) для динамічного вимірювання. У цьому випадку температуру достатньо вимірювати лише раз на секунду і використовувати це значення для всіх вимірювань тиску на той період часу.

Використовуючи різні режими вимірювання, можна вибрати оптимальний варіант між споживанням енергії, швидкістю та точністю (табл. 1).

Таблиця 1

Режим	Параметр дискретизації	Внутрішній номер параметра	Час перетворення АЦП (мс)	Споживання струму (мкА)	Похибка (м)
Малого споживання	0	1	4,5	3	0,5
Стандартний	1	2	7,5	5	0,4
Високої роздільності	2	4	13,5	7	0,3
Ультрависока роздільність	3	8	25,5	12	0,25

Користуючись технічною документацією датчика BMP085 [4], використано алгоритм перетворення значень даних з реєстрів у фізичні величини (рис. 1). На рис. 2 показано алгоритм роботи передавача з керуючим мікроконтролером.

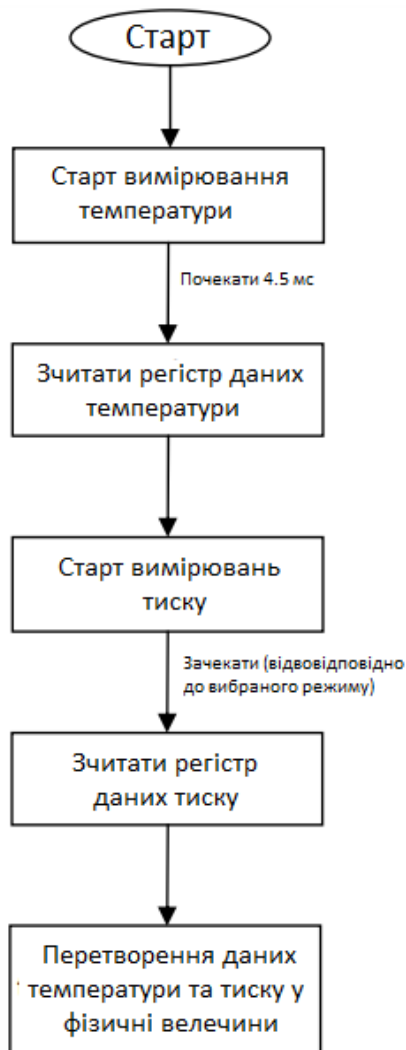


Рис. 1. Алгоритм отримання показників датчика



Рис. 2. Алгоритм роботи передавача

Керуючий мікроконтролер, після обробки даних з датчика готує їх для передачі та кодує. Після кодування, він передає дані по інтерфейсу 1-wire по вхід передатчика та слідує за закінченням передачі. Потім програма повторює цикл.

На рис. 3 показано алгоритм роботи приймача з керуючим мікроконтролером, на рис. 4 – алгоритм роботи керуючого мікроконтролера з LED-дисплеєм на базі TM1637.

Прототип передаючої частини автоматизованої системи розроблявся за схемою, що зображена на рис. 5. Для прототипування використовувались такі модулі:

- модуль датчика барометричного тиску BMP180;
- модуль-передавач каналу RF433 FS1000A;
- плата Arduino Nano.

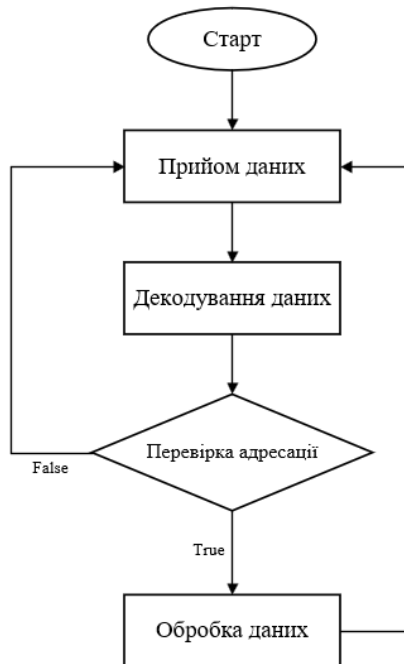


Рис. 3. Алгоритм роботи приймача з мікроконтролером



Рис. 4. Алгоритм роботи приймача

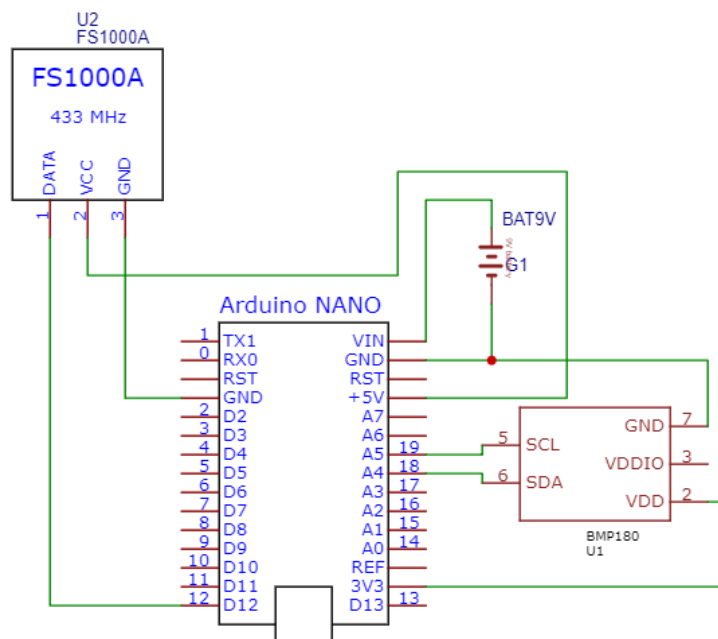


Рис. 5. Схема прототипу передавальної частини барометричного висотоміра

Схема створювалась за допомогою безплатного програмного забезпечення EASYEDA. Це програмне забезпечення дозволяє створювати і редагувати принципові, змішані аналогові та цифрові схеми.

Прототип приймачої частини автоматизованої системи розроблявся за схемою, що зображена на рис. 6. Для прототипування використовувались такі модулі:

- 4-розрядного 7-сигментного дисплея TM1637;
- приймач каналу RF433 MX-RM-5V;
- плата Arduino Nano.

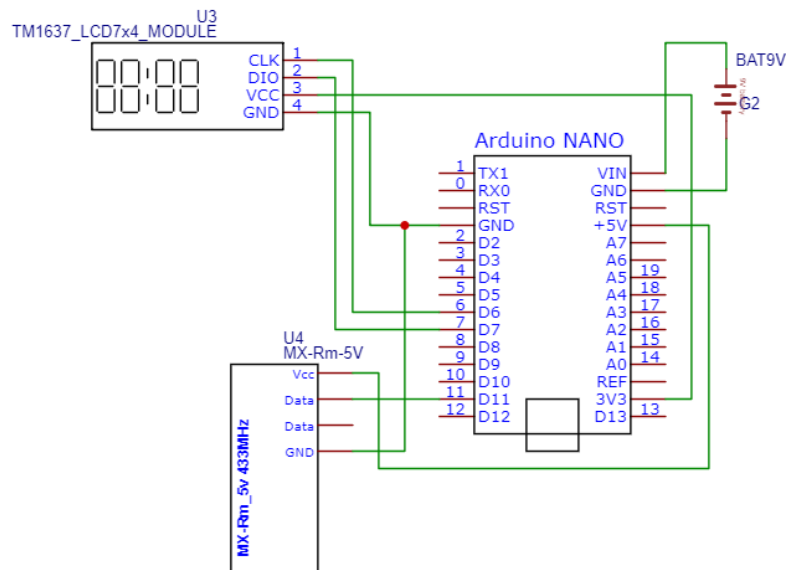


Рис. 6. Схема прототипу приймаючої частини барометричного висотоміра

Алгоритм роботи передавача у передаючій частині системи вимірювання висоти за допомогою барометричного тиску зображено на рис. 7.

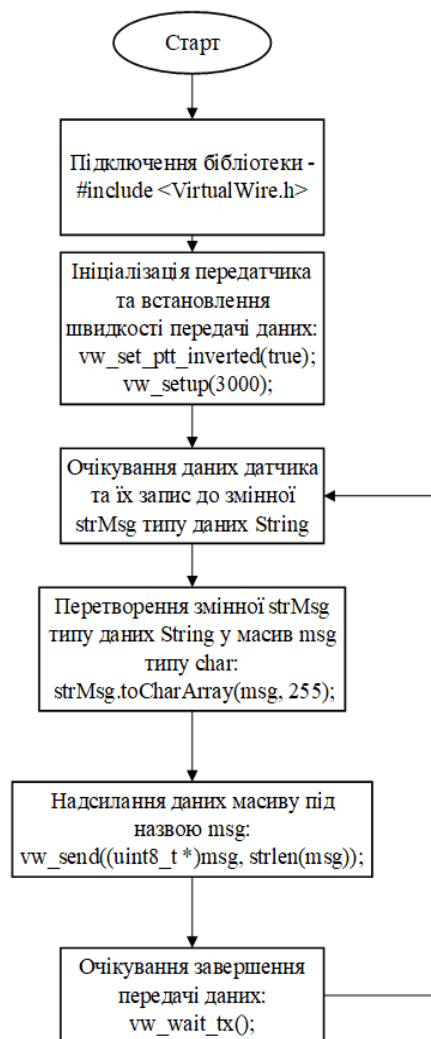


Рис. 7 Блок-схема алгоритму роботи передавача у передаючій частині системи

Передавач FS1000A, що знаходиться на борту безпілотної повинен отримати масив даних по протоколу OneWire перед передачею даних на пульт оператора, тому програмне забезпечення працює за алгоритмом описаним нижче.

Після підключення бібліотеки відбувається ініціалізація передавача та програмне встановлення швидкості передачі даних. Надалі відбувається очікування даних, що знімаються з датчика тиску та обробляються. Після цього відбувається перетворення змінних у тип даних, що відповідає можливості реалізації передачі даних згідно підключеної бібліотеки, у даному випадку цей тип даних є масивом `char`.

Далі програмний код звертається до оператора бібліотеки, який відповідає для подальшого перетворення масиву та надсилання даних на вхід приймача. Після надсилання цикл повторюється з моменту очікування даних.

Нижче вказані та прокоментовані стрічки коду, що відповідають за роботу з передавачем.

```
#include <VirtualWire.h>
// підключення бібліотеки
////////////////////////////////////
void setup(void)
{
    //////////////////////////////////////
    vw_set_ptt_inverted(true);
    // також необхідно для ініціалізації
    vw_setup(3000);
    // Встановлення швидкості передачі пакету даних (біт/с)
}
void loop(void) // початок циклу програми
{
    //////////////////////////////////////
    char symbol = 'h';
    // опис даних що надсилаються у даному випадку h - висота
    String strMsg = "z ";
    // ID безпілотної літального апарату що надсилає дані
    strMsg += symbol;
    strMsg += " ";
    // заповнення змінної
    strMsg += inth1;
    //заповнення змінної, у даному випадку дані висоти
    strMsg += " ";
    // заповнення змінної
    char msg[255];
    // масив призначений для передачі даних
    strMsg.toCharArray(msg, 255);
    // перетворення змінної в масив
    //////////////////////////////////////
    vw_send((uint8_t *)msg, strlen(msg));
    // надсилання даних
    vw_wait_tx();
    // очікування завершення надсилання даних
    //////////////////////////////////////
}
```

Алгоритм роботи зняття показів датчика, барометричного тиску BMP180 у передаючій частині системи вимірювання висоти безпілотної приведено на рис. 8.

У програмному коді ми спочатку підключаємо бібліотеки, що відповідають за обробку даних датчика BMP180. Після підключення бібліотеки призначається назва датчику(у даному випадку назва датчика – h) та створюються змінні якими програмний код буде оперувати. Далі відбувається ініціалізація датчика.

Після ініціалізації, спочатку, знімаються дані температури та заносяться в змінну. Значення температури необхідне для подальшого корегування залежності зміни висоти від тиску. Отримавши значення температури, програма зчитує певну вибірку значень та усереднює покази атмосферного тиску після чого обраховує значення висоти за формулою Бабіне (2).

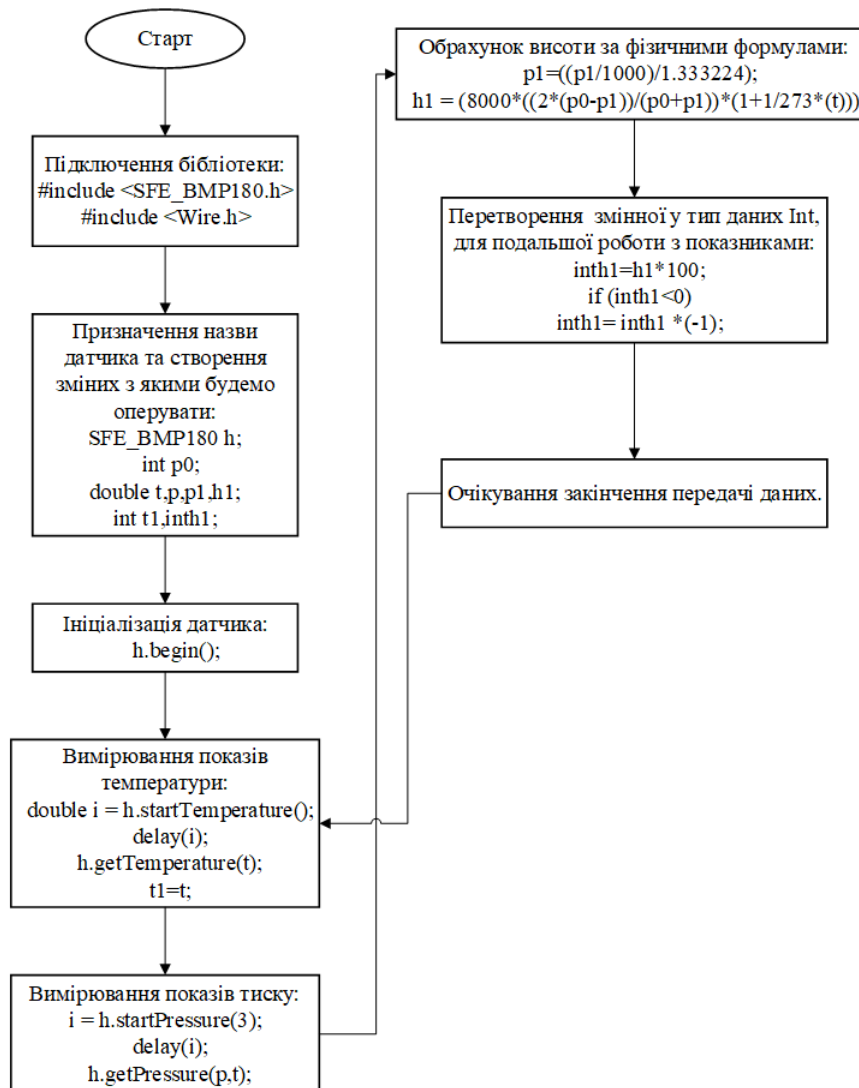


Рис. 8. Блок-схема алгоритму роботи зняття показів датчика у передаючій частині системи

Для передачі даних змінну що відповідає за покази висоти необхідно перетворити у відповідний тип даних для коректного надсилання на передавач. Після закінчення передачі цикл повторюється починаючи з вимірювання температури.

Нижче вказані та прокоментовані стрічки коду, що відповідають за роботу з датчиком тиску.

```

#include <SFE_BMP180.h>
#include <SFE_BMP180.h>
// підключення бібліотеки
SFE_BMP180 h;// задання назви датчику
int p0;
double t,p,p1,h1;
int t1,inth1;// створення змінних для подальшої роботи
////////////////////
void setup(void)
{
  h.begin();// ініціалізація
  ///////////////////
}

void loop(void) // початок циклу програми
{
  double i = h.startTemperature();// запит на вимір температури
  
```

```

delay(i); // час виміру
h.getTemperature(t); // зняття показів у змінну
i = h.startPressure(3); // запит на вимірювання та встановлення режиму виміру тиску
delay(i); // час виміру
p1 = 0; // онулювання змінної, для запобігання помилок виміру
for (int i=0; i<100; i++)
// початок циклу для знаходження середнього значення серед 100 вибірок
{
delay(1); // затримка для коректного зняття показів з датчика
h.getPressure(p,t); // Вимір тиску
p1 = p1+p; // заповнення суми зі 100 вибірок
}
p1 = (p1/100)/1.333224;
// знаходження середнього значення в мм рт. ст.
h1 = (8000*((2*(p0-p1))/(p0+p1))*(1+1/273*(t)));
// обрахунок висоти за формулою Бабіне (2)
inth1 = h1*100; // перетворення double в int без втрати сотих
if (inth1 < 0)
inth1 = inth1 * (-1); // модуль числа при виконанні умови
////////////////////
}

```

Алгоритм роботи приймаючої частини приведено на рис. 9.

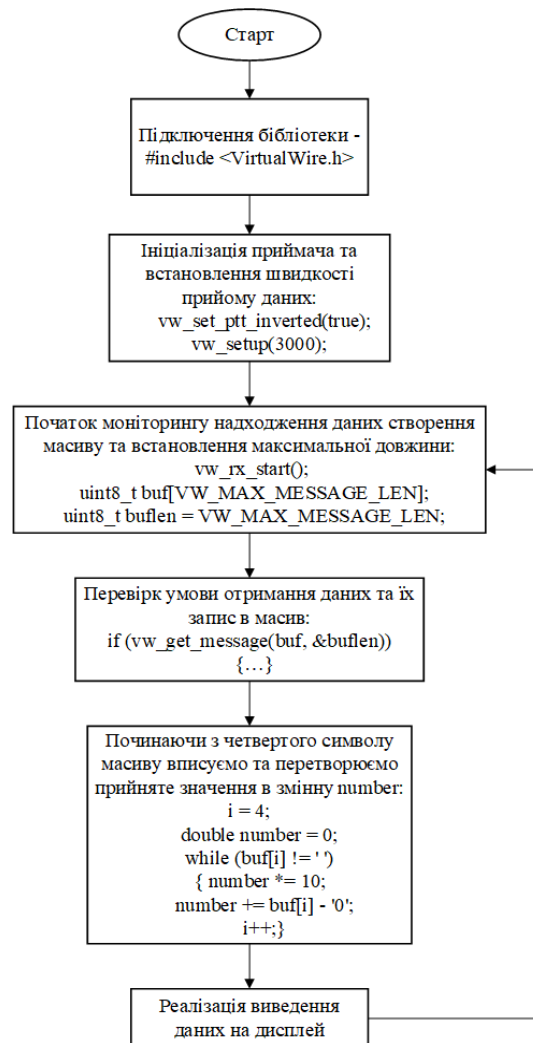


Рис. 9. Блок-схема алгоритму роботи приймаючої частини системи

Першим у алгоритмі програмного забезпечення, є підключення бібліотеки. Далі йде ініціалізація приймача та встановлення швидкості прийому даних. Для коректної роботи дана швидкість має відповідати швидкості передачі даних передавача. Після ініціалізації у програмному коді прописано створення масиву максимальної довжини.

Коли програма перевірила отримання даних, йде перевірка першої частини отриманого пакету. Це перевірка ID приймача та перевірка фізичної величини, що прийшла. Надалі відбувається перетворення пакету у тип даних який дасть змогу програмі в подальшому працювати з даними та виводити їх на дисплей. Після виводу значення, цикл повторюється починаючи з початку моніторингу надходження даних.

Нижче вказані та прокоментовані стрічки коду, що відповідають за роботу з приймаючою частиною.

```
#include <VirtualWire.h>
// підключення бібліотеки
////////////////////////////////////

void setup(void)
{
    //////////////////////////////////
    vw_set_ptt_inverted(true); // ініціалізація приймача
    vw_setup(3000); // Встановлення швидкості прийому
    //////////////////////////////////
}

void loop(void) // початок циклу програми
{
    vw_rx_start(); // Починаємо моніторинг
    uint8_t buf[VW_MAX_MESSAGE_LEN]; // створення масиву для даних
    uint8_t buflen = VW_MAX_MESSAGE_LEN; // максимальна довжина масиву
    if (vw_get_message(buf, &buflen))
    // перевірка умови отримання повідомлення
    {
        int i;
        // створення змінної що описує положення символу в масиві
        if (buf[0] != 'z') // перевірка ID передавача
        {
            return;
        }
        char command = buf[2];
        // command – команда що описує фізичну величину
        i = 4; // число починається з 4 розряду масиву
        double number = 0; // створення змінної для прийнятих значень
        while (buf[i] != '\0')
        // Оскільки передача посимвольна потрібно перетворити набір символів в число
        {
            number *= 10;
            number += buf[i] - '0';
            i++;
        }
        while (command == 'h') // виведення даних на дисплей при виконанні умови, що відповідає за
        // фізичну величину
        {
            //////////////////////////////////
        }
    }
}
```

Алгоритм роботи програмного коду приймаючої частини що відповідає за вивід даних на дисплей зображено на рис. 10.

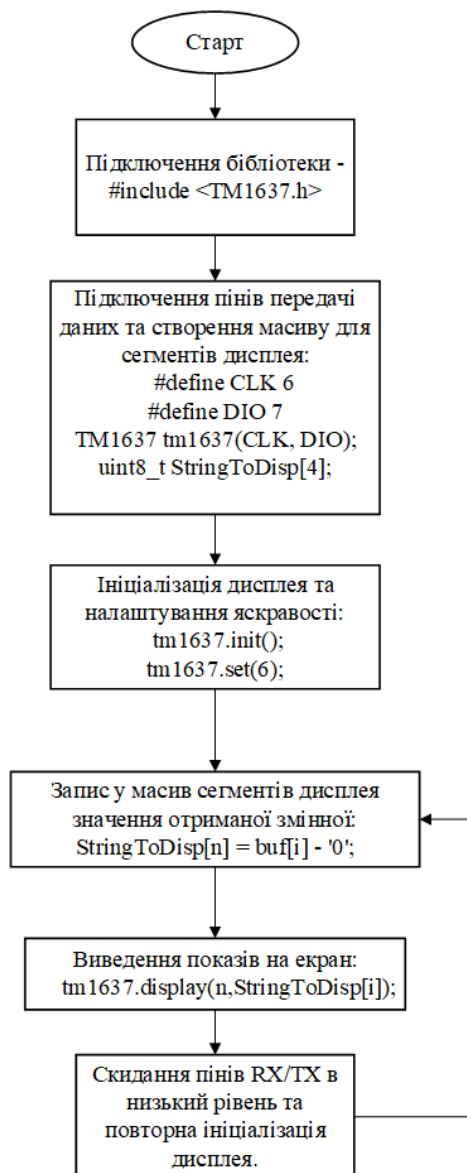


Рис. 10. Блок-схема алгоритму виводу даних на дисплей

Після підключення бібліотеки для роботи з дисплеєм, відбувається програмне підключення пінів CLK та DIO. Також створюється чотирисимвольний масив для чотирирозрядного дисплея.

Ініціалізація дисплея відбувається у двох місцях коду, на самому початку та у кінці кожного циклу після скидання в нуль пінів CLK та DIO. Далі програмне забезпечення зводиться до запису отриманої змінної у масив сегментів дисплея після чого відбувається виведення даних на екран. В кінці циклу програмного коду є обов'язковим скидання пінів передачі даних інакше вони будуть блокувати роботу приймача.

Нижче вказані та прокоментовані стрічки коду, що відповідають за роботу з дисплеєм.

```
//////////////////////////
#include "TM1637.h" // Підключення бібліотеки роботи з дисплеєм
#define CLK 6 //Підключення піна даних
#define DIO 7// Підключення піна даних
TM1637 tm1637(CLK, DIO);
//Звертаємось до об'єкта tm1637 класу TM1637
uint8_t StringToDisp[4];
//Створюємо масив для відображення на дисплеї
void setup(void)
{
```



```
tm1637.init();//Ініціалізація дисплея
//////////
tm1637.set(6);//налаштування яскравості
}

void loop(void) // початок циклу програми
{

// прийом та обробка даних
//////////
    while (command == 'c')      // початок виведення даних на дисплей при виконанні умови, що
відповідає за фізичну величину
        StringToDisp[0] = 12;
        StringToDisp[1] = buf[4] - '0';
        StringToDisp[2] = buf[5] - '0';
        StringToDisp[3] = buf[6] - '0';
// Запис даних що надійшли на дисплей у масив
tm1637.display(0,StringToDisp[0]);
tm1637.display(1,StringToDisp[1]);
tm1637.display(2,StringToDisp[2]);
tm1637.display(3,StringToDisp[3]);
// Виведення даних що надійшли, на дисплей
    delay (200); // затримка для сприйняття виведеної інформації
    digitalWrite(6, LOW);
    digitalWrite(7, LOW);
// скидання пінів RX/TX в низький рівень
    tm1637.init(); // ініціалізація дисплея
}
}
```

Висновки. Створено програмну модель, яка за допомогою методу нівелювання і розрахункових формул Бабіне та Лапласа програмним кодом виконувала розрахунки. Програма зчитує певну вибірку значень та усереднює покази атмосферного тиску після чого обраховує значення висоти. У роботі детально і поетапно приведено і описано програмний код, також приведені блок схеми.

Дисплей дає можливість виконувати правила сприйняття що є одним з найважливіших речей у людино-машинному інтерфейсі. Дисплей повинен мати високу роздільну здатність. Чіткість і якість відтворення важлива для розробки зручного дисплея. Якщо відтворювані символи або об'єкти, будуть мало помітні, оператор не зможе керуватись ними. Цю проблему при використанні обраного дисплея можливо використати програмно при «прошивці» керуючого мікроконтролера кодом, що програмує його максимальну яскравість. Сприймаючи чітко виведену інформацію на дисплеї, оператор пульта керування БПЛА може корегувати висоту польоту безпілотної. Інтерфейс I2C дозволяє легко інтегрувати датчик у систему з мікроконтролером. BMP085 забезпечує міцність, високу точність та лінійність електромагнітної сумісності, а також довготривалу стабільність.

References

1. Elektronnyi resurs: <http://euinfocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/28939.pdf>
2. Elektronnyi resurs: <https://www.rc-hobby.com.ua/infocenter/obzory-i-stati/dlya-chego-v-kvadrokoptere-barometr-ili-kak-rabotaet-rezhim-uderzhaniya-vysoty/>
3. Elektronnyi resurs: <https://helpiks.org/5-10511.html>
4. Elektronnyi resurs: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132068/BOSCH/BMP180.html>

УДК 004.092

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-7

ШАГІН В. Ю., НІЧЕПОРУК А. А., КАШТАЛЬЯН А. С.
Хмельницький національний університет

ЦЕНТРАЛІЗОВАНА РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ АТАК У КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

У роботі запропоновано архітектуру та компоненти розподіленої системи виявлення мережових атак, в якій поєднано вимоги централізованості, розподіленості, самоорганізованості та на її основі здійснено розробку централізованої розподіленої системи визначення мережових атак в корпоративних комп'ютерних мережах на основі мультифрактального аналізу. Проведені експериментальні дослідження з реалізованою централізованою розподіленою системою визначення мережових атак в комп'ютерних мережах підтвердили ефективність функціонування в комп'ютерній мережі.

Ключові слова: Розподілена система, Виявлення атаки, Мультифрактальний аналіз, Комп'ютерна мережа.

SHAGIN V., NICHEPORUK A., KASHTALIAN A.
Khmelnitskyi National University

CENTRALIZED DISTRIBUTED ATTACK DETECTION SYSTEM IN CORPORATE COMPUTER NETWORKS BASED ON MULTIFRACTAL ANALYSIS

The architecture and components of a distributed network attack detection system are proposed in the paper, which combines the requirements of centralization, distribution, self-organization and on its basis develops a centralized distributed network attack detection system in corporate computer networks based on multifractal analysis. Experimental studies with a centralized distributed system for detecting network attacks in computer networks have confirmed the effectiveness of functioning in a computer network.

The proposed centralized system is based on the use of multifractals. Multifractals are complex fractals that occur, as a rule, in nature. In fact, the multifractal approach means that some object under study can be divided into parts that have their own similarity characteristics that are different from others. Network traffic is self-similar at some intervals. Therefore, the method of maxima of wavelet transform modules will be used for its analysis, which allows to determine the features of the signal.

To conduct experimental research, a distributed system was implemented and software was deployed to detect attacks on local computer networks. The study found that the total data processing time is about 8 seconds, while the amount of data is almost 4.9 million lines, in the format of a text document, this data is more than 700 megabytes. Thus, this indicates the high speed of the algorithm and the efficiency of system resources.

Keywords: Distributed System, Attack Detection, Multifractal Analysis, Computer Network.

Вступ. Зі зростанням об'ємів інформації, що передаються через мережу зростає і число апаратних та програмних засобів для втручання в процес передачі даних. Щодня все більше користувачів в інтернеті стають жертвами дій зловмисного програмного забезпечення. Особливу небезпеку становлять атаки та корпоративні системи, що можуть спричинити фінансові збитки організаціям чи безпосередньо їх працівникам.

Для мінімізації кількості успішних мережових атак в корпоративних комп'ютерних мережах може бути використана математична статистика. Оскільки в корпоративних комп'ютерних мережах, як правило, присутня велика кількість комп'ютерів необхідні ефективні методи виявлення та реагування на активність в мережі. Існує твердження, що немає абсолютно захищеної системи, проте можливе суттєве зниження шансу на несанкціонований доступ до даних чи комп'ютерної системи загалом. Для протидії активності зловмисників необхідний комплексний підхід до розробки методів виявлення вторгнень та систем, в які інтегруються ці методи.

Концепція розподілених систем. На сьогоднішній день питання надійності комп'ютерної мережі є надзвичайно важливим. Тому для бізнесу широко використовуються розподілені мережі, які можуть бути реалізовані за допомогою програмного продукту. Концепт розподіленої мережі можна трактувати по різному. В широкому розумінні це робочі станції, що обмінюються інформацією та спільно її обробляють, при цьому кожна робоча станція може мати різну обчислювальну потужність та ємність сховища даних.

Модель розподіленої мережі передбачає поділ завдань між клієнтам чи серверами, що залежить від того, чи підходить конкретна машина для обробки даних [1–5]. За цим типом архітектури частина додатку виконується клієнтом, а інша частина сервером. З клієнт-серверним типом побудови програмного забезпечення користувач працює лише з обмеженою кількістю даних, включаючи інтерфейс користувача, користувацький ввід та запити до бази даних. Контроль доступу до бази даних, отримання чи обробку даних користувачем здійснює безпосередньо сервер. При цьому важливо перевіряти чи справді клієнт має дозвіл на оперування інформацією. Для цього проводять процедуру двох голосувань. Під час першого голосування кожен вузол отримує довіру, розподіляючи інформацію про відкриття сусідів розподіленої мережі.

Сусідні вузли створюють довірене оточення. Якщо вузол обмінюється інформацією з іншими в достатній мірі – він може і далі спілкуватись з рештою в мережі, в іншому випадку він відхиляється. Якщо вузол загрожує мережі та проявляє підозрілу поведінку – відбувається друга процедура відкликання голосування. В цьому випадку, якщо оточуючі вузли вказують на підозрілу активність свого сусіда – блокуються весь обмін даними з цим вузлом по всій мережі.

Основними властивостями розподіленої системи за теоремою CAP [6] є цілісність, доступність та стійкість до відмов (Consistency, Availability, Partition tolerance). Проте будь-яка розподілена система може мати не більше двох властивостей.

Цілісність або узгодженість системи за теоремою CAP означає її лінійність. Кожна наступна операція повинна мати інформацію про результат попередньої. Доступність системи означає безперерйну успішну обробку запитів на всіх активних вузлах. Якщо частина вузлів не відповідає чи система відповідає не на всі запити – за теоремою CAP це непостійна доступність. Стійкість до відмов в першу чергу забезпечує стабільну роботу всієї системи. Наприклад, якщо кластер із декількох серверів втратив з'єднання з половиною своїх вузлів – робота системи продовжується, хоч і було втрачено доступність. В іншому випадку частини кластера працюють незалежно один від одного та відповідають на запити користувачів. В такому випадку тільки після відновлення зв'язку між всіма ланками розподіленої системи буде зрозуміло, що це була єдина система.

Згідно теореми CAP можна виділити три варіанти проектування розподіленої системи: AC – доступність та цілісність; CP – цілісність та стійкість; AP – доступність та стійкість.

AC системи мають суттєвий недолік – відсутність стійкості до відмов мережі. Використання цього типу систем вимагає чіткого усвідомлення всіх ризиків. В іншому випадку необхідно обирати між цілісністю та доступністю системи.

Таким чином, з огляду на широку розповсюдженість централізованої архітектури, важливим завданням є проектування системи, яка дозволить здійснити виявлення атак та підвищити загальний рівень безпеки всієї мережі.

Централізована система виявлення атак в корпоративних комп'ютерних мережах на основі мультифрактального аналізу. В основі запропонованої централізованої системи закладено використання мультифракталів. Мультифракталами називають складні фрактали, що зустрічаються, як правило, в природі. Фактично мультифрактальний підхід означає, що деякий досліджуваний об'єкт можна розділити на частини, що мають власні характеристики подібності, відмінні від інших. Мережевий трафік є самоподібним на деяких часових проміжках. Тому для його аналізу буде використано метод максимумів модулів вейвлет-перетворення, що дозволяє визначити особливості сигналу.

Для аналізу параметрів мультифрактального спектру використаємо наступний алгоритм:

Декомпозиція вихідного сигналу $f(t)$ на коефіцієнти батьківським вейвлетом $\psi(t)$:

$$W_f(u, j) = (f(t), \psi_{u,j}(t)) = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{t-u}{2^j} dt$$

де u – параметр масштабу,

j – просторова координата чи момент часу.

В масиві коефіцієнтів знаходимо позиції локальних максимумів $\{u_p(j)\}_{p \in \mathbb{Z}}$ та знаходимо їх абсолютне значення та формуємо масив максимумів

$$|W_f(u_p, j)|;$$

Визначення функції розбиття:

$$S(q, j) = \sum_p |W_f(u_p, j)|^q;$$

Для кожного $q \in \mathbb{R}$ обчислюємо показник масштабу:

$$\tau(q, j) = \liminf_{j \rightarrow 0} \frac{\ln S(q, j)}{\ln 2^j};$$

Обчислюємо мультифрактальний спектр за допомогою перетворення Лежандра:

$$f_L(\alpha) = \min_{q \in \mathbb{R}} [q(\alpha + 1/2) - \tau(q)];$$

Для кожного проміжку j обчислюємо мультифрактальні розмірності порядку q :

$$D_{q,j} = \frac{1}{q-1} [q(\alpha(q, j) - f_L(\alpha(q, j)))].$$

Для ілюстрації та аналізу мережевого трафіку обрано його інтенсивність, тобто кількість відправлених та прийнятих пакетів за одиницю часу.

Принцип виявлення вторгнень запропонованої системи наступний. Нехай X – часовий ряд звичайного трафіку, Y – часовий ряд шкідливого трафіку, Z – часовий ряд аномалій. Звідси $Y=X+Z$. Незалежно від наявності властивостей самоподібності в часовому ряді аномалій – Y все ще буде самоподібним процесом, якщо X стаціонарний самоподібний процес. Проте ступінь самоподібності може змінюватись. Нехай s_X, s_Y, s_Z функції автокореляції для X , Y та Z відповідно. Тоді під час атаки акцентуємо увагу на $\|s_Y - s_X\|$, при цьому $s_Y = s_X + s_Z$. Для кожного $H \in (0.5, 1)$ існує лише одна функція автокореляції з самоподібністю. Тому розглядається $\|H_Y - H_X\|$, де H_Y та H_X – середнє значення показників Херста X та Y відповідно. Коефіцієнт Херста вводиться для підвищення точності оцінки самоподібності системи. Недоліком підходу є необхідність перезапуску визначення порогу самоподібності трафіку для кожного масштабу. Тому сигнал про зміну самоподібності буде подано незалежно від того, чи існує він для іншого масштабу. Після визначення мережевої атаки трафік розбивається на декілька частин. Інтенсивність атаки можна визначити за допомогою аналізу показника Херста та швидкості його зміни, тобто різниці між показниками Херста до факту атаки та після [7].

Визначення точки зміни самоподібності трафіку базується на тому, що ентропія послідовності зі змінною граничною точкою самоподібності більша ніж ентропія послідовності з фіксованою точкою.

На рис. 1 представлено схему оцінки безпеки мережевого трафіку. Алгоритм складається з п'яти етапів:

1. Збір трафіку.
2. Статистичний аналіз.
3. Оцінка показника Херста.
4. Визначення аномалій.
5. Оцінка безпеки.

Для зменшення впливу на функціонування мережі трафік дублюється на сервер, що збирає мережеву інформацію кожного з підключених клієнтів.

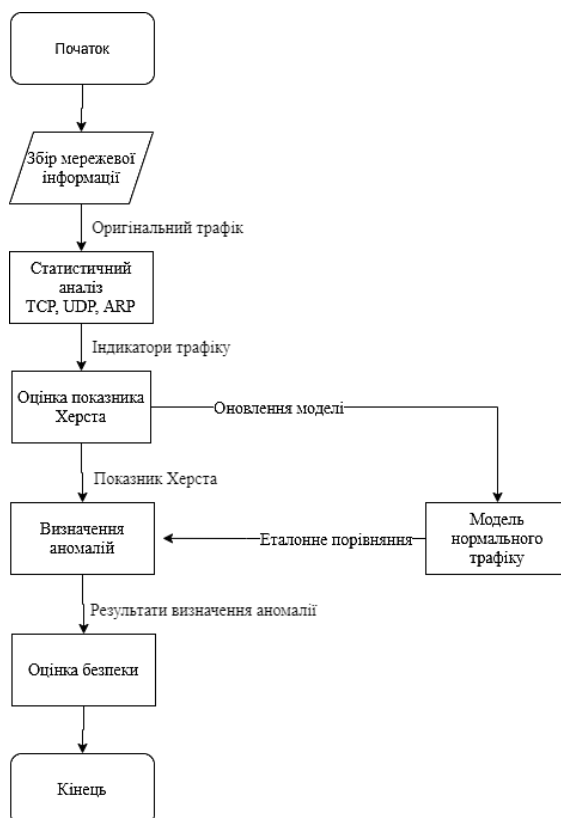


Рис. 1. Визначення оцінки безпеки мережевого трафіку

Експериментальні дослідження. Для розробки централізованої системи виявлення атак було використано середовище Microsoft Visual Studio Community 2019. Досліджувана централізована система складалась з одного сервера та двох клієнтських станцій.

Для реєстрації мережевих пакетів було обрано бібліотеку з відкритим вихідним кодом SharpPcap.

Бібліотека SharpPcap підтримує наступні мережеві протоколи: Ethernet, LinuxSLL, Ip (IPv4 and IPv6), Tcp, Udp, ARP, ICMPv4 и ICMPv6, IGMPv2, PPPoE, PTP, Link Layer Discovery Protocol (LLDP), Wake-On-LAN (WOL). Основними можливостями цього пакету є визначення активних мережевих пристроїв, формування статистики, зчитування мережевої інформації з активних мережевих пристроїв та читання з файлів, фільтрація пакетів, збереження мережевої інформації в файл. Форматом даних є Pcap та pcap-ng, за умови використання pcap чи libpcap версії 1.1.0 та вище.

В результаті дослідження було реалізовано наступні модулі: «WebAPI», «Common», «Database», «EntityFramework», «Repository» та «Services». Клієнтський додаток виступає в ролі фонові служби та не має графічного інтерфейсу чи ключів запуску для повної автономності. Тому використовуючи методи бібліотеки SharpPcap додаток самостійно знаходить активний мережевий інтерфейс та відкриває підключення до нього.

Для дослідження методу було використано пакет прикладних програм аналізу та програмування Matlab. Візуалізація мультифрактального спектру відбувається вбудованими засобами програмного забезпечення.

Розроблене програмне забезпечення використовує набір даних KDD Cup [8], який конвертовано в таблицю засобами Matlab. Для виведення графіків трафіку використано значення кількості пакетів. В даному наборі даних кожен рядок можна розглядати як статистику активності за одиницю часу. Перед створенням графіків програма фільтрує статистичні дані за кожним наявним типом мережевих атак. Далі формуються графіки мережевого трафіку для кожного виду мережевих атак та окремо графік нормального трафіку.

Результатом виконання представленого вище коду є графік мережевого трафіку, графік автокореляційної послідовності та мультифрактальний спектр (рис. 2).

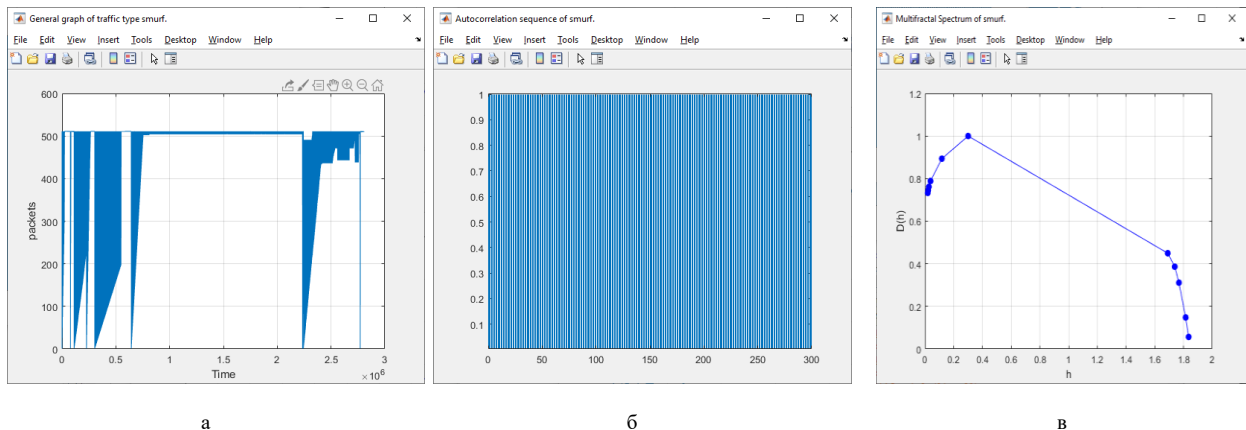


Рис. 2. Результати проведеного експерименту:
а) графік активності мережевої атаки smurf;
б) автокореляційна послідовність мережевої атаки smurf;
в) мультифрактальний спектр мережевої атаки smurf

Слід відзначити, що запропонований метод має обмеження: при недостатній кількості значень в автокореляційній послідовності неможливо сформувати мультифрактальний спектр. На це впливає кількість випадків визначеного типу атаки на часовій шкалі. Яскравим прикладом з набору даних є активність мережевої атаки rootkit, що зображено на рисунку та її автокореляційна послідовність (рис. 3).

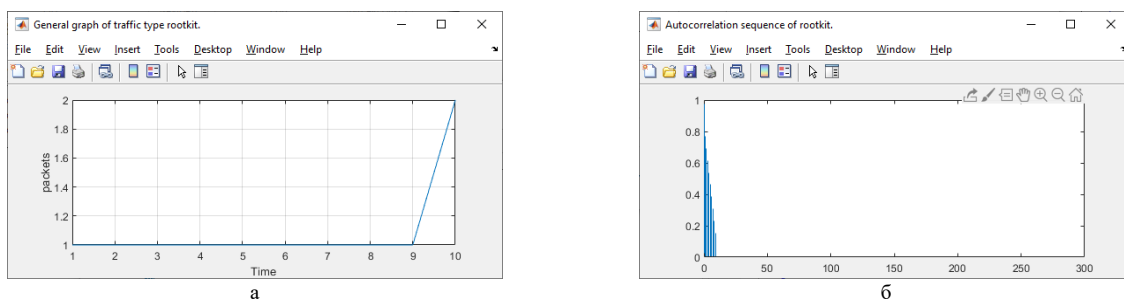


Рис. 3. Результати системи при недостатній кількості значень в автокореляційній послідовності на прикладі мережевої атаки RootKit:
а) графік активності мережевої атаки; б) автокореляційна послідовність мережевої атаки

Проте, разом з тим запропонована система, при достатній кількості даних, дозволяє здійснити не тільки факт виявлення атаки, а й розрізнити її тип (рис. 4).

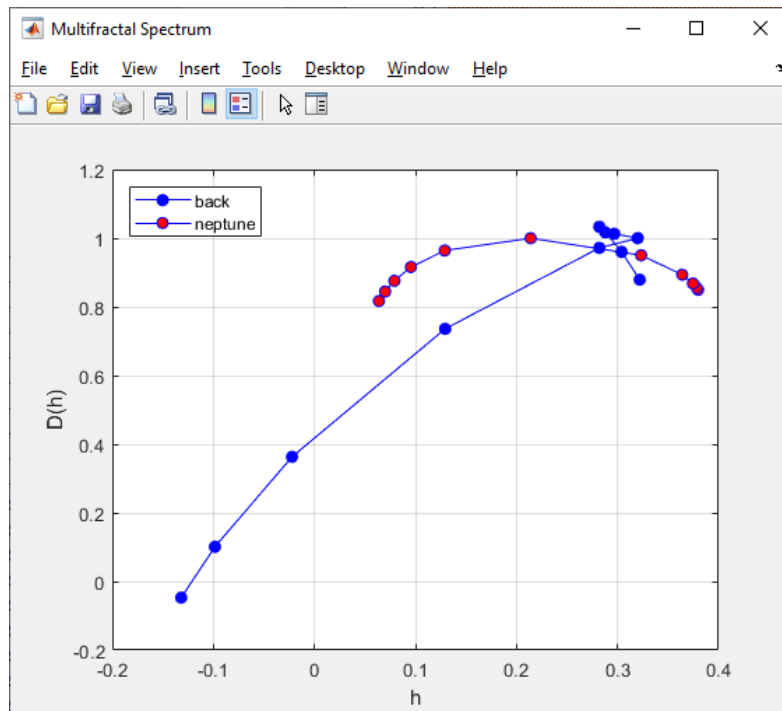
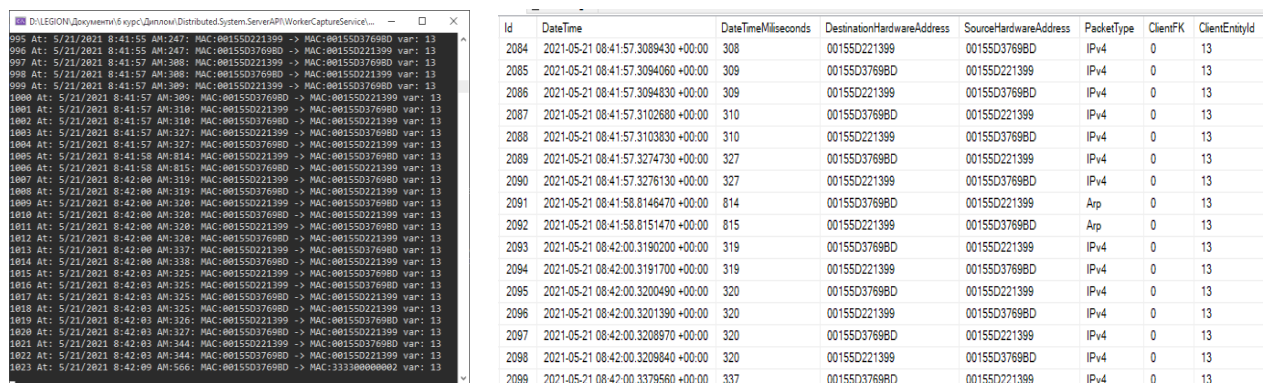


Рис. 4. Мультифрактальний спектр двох різновидів DOS атак

Виконання клієнтського програмного забезпечення не потребує багато ресурсів та невидиме для користувача, оскільки відбувається в якості фонові служби. Для налагодження програми було використано консоль, де відбувається виведення активності вузла (рис. 5).



а

б

Рис. 5. Результати роботи розробленого програмного забезпечення:

а) консоль клієнтського додатку, б) фрагмент таблиці отриманих мережевих пакетів

В процесі реалізації запропонованої системи було визначено також швидкість її роботи. Так загальний час обробки даних складає близько 8 секунд, тоді як об'єм даних складає майже 4,9 мільйони рядків, в форматі текстового документу ці дані займають більше 700 мегабайт. Таким чином, це свідчить про високу швидкість роботи алгоритму та ефективність використання системних ресурсів.

Висновки. В результаті проведеного дослідження розроблено архітектуру та компоненти розподіленої системи виявлення мережевих атак, в якій поєднано вимоги централізованості, розподіленості, самоорганізованості та на її основі здійснено розробку централізованої розподіленої системи визначення мережевих атак в корпоративних комп'ютерних мережах на основі мультифрактального аналізу. Проведені експериментальні дослідження з реалізованою централізованою розподіленою системою визначення мережевих атак в комп'ютерних мережах підтвердили ефективність функціонування в комп'ютерній мережі.

References

1. C. Sarkar, A. U. Nambi S. N., R. V. Prasad, A. Rahim, R. Neisse and G. Baldini, "DIAT: A Scalable Distributed Architecture for IoT," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 2, no. 3, pp. 230-239, June 2015, doi: 10.1109/JIOT.2014.2387155.

-
2. F. Jammes et al., "Technologies for SOA-based distributed large scale process monitoring and control systems," IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 5799-5804, doi: 10.1109/IECON.2012.6389589.
 3. S. Helen, IRM: Integrated file replication and consistency maintainence in P2P Systems, IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, Vol. 21, No. 1, January 2010, pp. 100-113.
 4. A. Sperotto, G. Schaffrath, R. Sadre, C. Morariu, A. Pras and B. Stiller, "An overview of ip flow-based intrusion detection", IEEE communications surveys & tutorials, vol. 12, no. 3, pp. 343-356, 2010.
 5. A. Gupta, O. J. Pandey, M. Shukla, A. Dadhich, S. Mathur and A. Ingle, "Computational intelligence based intrusion detection systems for wireless communication and pervasive computing networks," 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 2013, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCIC.2013.6724156.
 6. S. S. Y. Shim, "Guest Editor's Introduction: The CAP Theorem's Growing Impact," in Computer, vol. 45, no. 2, pp. 21-22, Feb. 2012, doi: 10.1109/MC.2012.54.
 7. P. Dymora, M. Mazurek, Anomaly detection in iot communication network based on spectral analysis and hurst exponent, Applied Sciences 9, 5319 (2019). doi: 10.3390/app9245319
 8. KDD Cup 1999 Dataset, URL: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html>

УДК 004.056.5:621

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-8

ПРАВОРСЬКА Н. І., БЕДРАТЮК Л. П.,
ФОРКУН Ю. В., ЯШИНА О. М.
Хмельницький національний університет

МОВНОНЕЗАЛЕЖНИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ І УСУНЕННЯ ПОВТОРІВ ТА НАДЛИШКОВОСТЕЙ ПРОГРАМНОГО КОДУ

Під час розробки програмного забезпечення існує ймовірність того, що в програмному коді можуть траплятися помилки, які допускають навіть фахівці-розробники, припускаючись дублюванню частин коду. Для усунення майбутніх збоїв в режимі функціонування програмного продукту, існує ряд автоматизованих інструментів, спроможних проводити оцінювання ремонтпридатності на основі ряду заздалегідь визначених критеріїв, таких як обсяг і складність коду, зв'язок модулів, тощо. Автоматичне виявлення блоків з повторами та надлишковостями в програмному коді сучасних проектів стає основою для майбутнього ручного або автоматичного рефакторінгу, який призводить до більш чистого та зручного у супроводі коду. Одним з таких інструментів виступає запропонований мовнонезалежний детектор, який використовує інкрементний підхід та його покращення з використанням локально-чутливого хешування.

Ключові слова: програмний код, мовно незалежний детектор, інкрементний підхід, локально-чутливе хешування

N. PRAVORSKA, L. BEDRATYUK,
Yu. FORKUN, O. YASHYNA
Khmelnytsky national university

LANGUAGE-INDEPENDENT DETECTOR FOR DETECTING AND ELIMINATING REPETITIONS AND EXCESSES OF SOFTWARE CODE

When developing software (software) there is a possibility that mistakes made even by developers, in the future will lead to violations of the normal operation of the software product. Corrections can usually be made at any stage of the software life cycle. However, it should be borne in mind that the detection and correction of errors in the program code in the final stages of development can have a very significant impact on the costs (both financial and time) of software development and maintenance. In addition, some errors are dangerous to human life and health if they appear during operation. Therefore, in the development of software products in their life cycle, a variety of tools have become widely used, which analyze the software code and help identify defects. A number of different problems in the source code of the system arise precisely because of the presence of a significant share of code duplication. The increase in the size of the code base, and accordingly, the increase in maintenance costs, in particular, is a consequence of duplication. In addition, when an error occurs in one of the instances of the block with duplicates (clones) and redundancies, every other block is subject to verification for the same error and the possibility of potential correction. To solve the last problem, you need not only to know the lists of duplicate blocks of code, but also to have a significant amount of time required to go through all the instances. Finally, duplication causes problems in terms of understanding the program code and complications of future refactoring. It is important that the foundation for future manual or automatic refactoring, which leads to a cleaner and easier to maintain code, is the automatic detection of clones (blocks with repetitions and redundancies) in modern software projects. In this regard, the various methods of detecting blocks with repetitions proposed today, mainly work with the entire code base of the system. Regardless of the magnitude of the changes, similar methods for each version of the source code use the entire system as input. This approach may work well for stable outdated systems that are occasionally updated. However, at the current stage of IT development, this is not an ideal option due to flexible software development. In the process of detecting blocks with repetitions and redundancies for the next check, unprofitable calculations will be performed, which are added to the total execution time.

During the software development, there is a probability that in the program code there may be errors that allow even developers specialists, assuming duplicate parts of the code. In order to eliminate future failures in the functioning of the software, there are a number of automated tools that are capable of evaluating repairability based on a number of predefined criteria, such as the scope and complexity of the code, communication of modules, etc. Automatic detection of repetitions and excesses in the software code of modern projects becomes the basis for future manual or automatic refactoring, which leads to a cleaner and convenient code accompaniment. One of these instruments is the proposed linguistic detector that uses an incremental approach and improving it using locally-sensitive hashing.

Keywords: Program code, Language independent detector, incremental approach, locally-sensitive hashing.

Вступ. При розробці програмного забезпечення (ПЗ) існує ймовірність того, що допущені помилки навіть фахівцями-розробниками, в майбутньому призведуть до порушень нормального режиму функціонування програмного продукту. Виправлення, звичайно можна провести на будь-якому з етапів життєвого циклу ПЗ. Однак, треба враховувати, що виявлення та виправлення помилок в програмному коді на останніх етапах розробки можуть дуже суттєво вплинути на витрати (як фінансові, так і часові) розробки та супроводу ПЗ. До того ж деякі помилки становлять небезпеку життю і здоров'ю людей, якщо вони стануть проявлятися на етапі експлуатації. Тому при розробці програмних продуктів в їх життєвому циклі, широкого використання набули різноманітні інструменти, які проводять аналіз коду програмного забезпечення і сприяють виявленню дефектів. Ряд різноманітних проблем в вихідному коді системи, виникає саме через наявність

значної долі дублювання коду. Збільшення розміру кодової бази, і відповідно, збільшення затрат на обслуговування, зокрема, є наслідком дублювання [1]. Крім цього, коли виникає помилка в одному з екземплярів блоку з повторами (клонами) та надлишковостями, перевірка підлягає кожен інший блок на наявність тієї ж помилки та можливості потенційного виправлення [2]. Для вирішення останньої задачі, треба не лише знати списки дубльованих блоків коду, а й мати значну кількість часу, потрібного для проходження по всім екземплярам. Нарешті, через дублювання виникають проблеми з точки зору розуміння програмного коду і ускладнень майбутнього рефакторінгу [1]. Важливо, що закладення основ для майбутнього ручного або автоматичного рефакторінгу, який призводить до більш чистого та зручного у супроводі коду, полягає в автоматичному виявленні клонів (блоків з повторами та надлишковостями) у сучасних програмних проектах. В цьому відношенні, різноманітні методи виявлення блоків з повторами, запропоновані на сьогодні, в основному працюють зі всією кодовою базою системи. Незалежно від величини внесених змін, подібні методи для кожної версії вихідного коду, використовують в якості вхідних даних всю систему. Такий підхід може добре працювати для стабільних застарілих систем, які зрідка оновлюються. Однак, на сучасному етапі розвитку ІТ, це не являється ідеальним варіантом, через гнучку розробку програмного забезпечення. В процесі виявлення блоків з повторами та надлишковостями для наступної перевірки, будуть виконуватися збиткові обчислення, які додаються до загального часу виконання.

Основи розробки мовно-незалежного інкрементного детектору повторів (МНІДП). Потреба в інкрементних підходах виникла через вказані вище недоліки, поряд з еволюцією практик розробки програмного забезпечення та появи таких концепцій, як безперервна інтеграція/розробка (CI/CD – continuous integration/development), гнучкість та швидкість. В цьому контексті основною ідеєю виступає повторне використання інформації, яка отримується в результаті аналізу одного перегляду, для наступного, виключаючи непотрібні неефективні за часом операцій. Деякими компаніями (наприклад, SIG – група вдосконалення програмного забезпечення) розробляються автоматизовані інструменти, спроможні проводити оцінювання ремонтпридатності на основі ряду заздалегідь визначених критеріїв, таких як обсяг і складність коду, зв'язок модулів, тощо. Для виявлення подібних критеріїв використовуються детектори повторів та надлишковостей (клонів частин коду). На основі отриманих результатів визначається доля дубльованого коду в кодовій базі проекту. Саме компанія SIG була розробником подібного детектору повторів із реальною застосовністю слів. Якщо брати за основу контекст SIG, то пропонується розробка незалежного від мови програмування інкрементного детектору повторів (клонів) та оцінка його продуктивності. В роботі розроблена методика носить назву мовно-незалежний інкрементний детектор повторів (МНІДП). При цьому підході використовувався алгоритм, який базується на основі індексу, запропонований Бенджаміном Хаммелом та ін [3]. Основною структурою даних, яка використовується виступає індекс клону. Він представляє собою глобальну структуру даних, яка нагадує типовий інвертований індекс. Цей метод, хоча і використовує лексичний аналізатор для перетворення вихідного коду в токени, але серед всієї літератури з цього питання є найближчим до незалежного від мови інкрементного підходу. По суті, проводиться поділ інкрементного методу даного дослідження на два основних робочих процеси. В свою чергу кожний буде включати в себе додатково ряд підпроцесів. Проміжне представлення пов'язується з першим процесом і збережене для повторного використання в версіях проекту. Таке об'єднання (сектор) буде вважатися за індекс повторення (клонування). Весь проект програмного забезпечення використовується цим процесом в якості вхідних даних. Запуск його відбувається одноразово на початку всього конвеєра виявлення повторів (клонів блоків коду). Другий процес, який посиляється на логіку, проводить запуск фактичної процедури виявлення повторів та надлишковості коду та виводить виявлені клони. Процес буде запущено після оновлення основної бази з кодами. В реальному налаштуванні це відбувається після того, як новий запис (commit) буде розміщено в репозиторій керування версіями.

Результати досліджень з використанням МНІДП і його вдосконалення, шляхом застосування локально-чутливого хешування (ЛЧХ). В якості вихідних даних для проведення досліджень було використано програмні проекти різного розміру, під час оцінювання та порівняння запропонованого підходу з традиційним підходом виявлення клонів, застосовуваний SIG. Такими проектами виступили:

Rippled – система додавання автоматизації PR для проектних плат, написана на мовах C / C++;

Kooboo – безкоштовна система керування контентом, написана на мовах C#, JS, HTML, CSS;

Tensorflow – відкрита програмна бібліотека для машинного навчання, розроблена компанією Google для вирішення завдань побудови і тренування нейронної мережі з метою автоматичного знаходження та класифікації образів, досягаючи якості людського сприйняття, написана на мовах C++, Python;

Openjdk-jdk14u – це реалізація платформи Oracle Java Standard Edition із відкритим кодом. OpenJDK корисний для розробки програм Java і забезпечує повне середовище виконання для запуску програм Java, написана на мові Java;

Linux Kernel – ядро операційної системи, що відповідає стандарту POSIX. Складає основу операційних систем сімейства Linux, написана на мові C.

Конкретніше, було використано інструмент SAT SIG при проведенні аналізу набору даних для запропонованого дослідження, який складається з п'яти проектів з відкритим кодом. Зважаючи на те, що

SAT є складним інструментом, до якого входить множина базових операцій, що не мають відношення до виявлення дубльованого коду, було прийнято рішення ізолювати відповідні частини та провести заміри частки загального часу, який пройшов. Ця частка напряму пов'язана з виявленням блоків з повторами та надлишковостями в програмному коді.

Результатом експериментів з використанням МНІДП стало покращення часу, необхідного для виявлення повторюваних фрагментів коду, згідно параметрів SAT, що можна побачити з таблиці 1.

Таблиця 1.

Параметри SAT та загальний час виявлення МНІДП

Проект	Загальний час аналізу SAT	Час виявлення клонів	Створення індексу МНІДП та час інкрементного кроку
Rippled	4 хв	5.63 с	4.6 с
Kooboo	22 хв	397 с	16.31 с
Tensorflow	8 год. 30 хв	177.1 с	91.29 с
Openjdk-jdk14u	N/A	N/A	56.34 с
Linux Kernel	N/A	N/A	>321.21 с

Стосовно виявлення в програмному коді блоків з повторами та надлишковостями (інакше, клонів), проводиться запуск МНІДП для чотирьох програмних систем, для яких наша машина спроможна витримати навантаження інкрементного кроку (через розміри ядра системи Linux, її не опрацьовували). Більш конкретно, для спрощення було вирішено піддавати аналізу десять самих останніх комітів (тобто операцій, які відправляють останні зміни вихідного коду в репозиторії, що робить ці зміни частиною основної ревізії репозиторіїв) для кожної системи. Потім відбувався підрахунок кількості доданих та знижених клонів, які будуть виявлені запропонованим інструментом. Загальний огляд кількості файлів, на які впливає кожний коміт представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Файли, які зазнали впливу на програмну систему для кожного аналізованого коміту

№ з/п	# Оновлені файли в коміті			
	Rippled	Kooboo	Tensorflow	OpenJDK-14
1	1	6	1	3
2	2	3	1	1
3	0 (пропущений)	1	2	4
4	3	1	0 (пропущений)	1
5	1	1	0 (пропущений)	0 (пропущений)
6	2	1	1	1
7	1	2	1	2
8	3	3	1	5
9	2	1	2	0 (пропущений)
10	1	3	1	0 (пропущений)

Хоча типи змін, які вносяться в проаналізовані файли (додавання, оновлення, перейменування, видалення) не були вказані, більшість з них відповідають модифікаціям існуючих файлів. Записи в таблиці, відмічені як «0 (пропущений)», відповідають комітам, які не піддавалися обробці, з причини включення в них тільки файлів, які за замовчуванням ігноруються МНІДП (наприклад, текстові файли). Це призводить до того, що блоки з повторами та надлишковостями, відповідні змінам файлам, будуть виявлені як знижені під час кроку видалення та як заново додані під час підкроку додавання.

На рис. 1–4 представлені блоки з повторами та надлишковостями, які були додані та видалені для кожного коміту кожної програмної системи. До речі, МНІДП проводить розгляд модифікованих файлів, як видалення (інакше знищення), за яким іде створення.

Зауважимо, що через величину ядра системи Linux, тут так само, запропонована установка не змогла відпрацювати із навантаженням пам'яті цього процесу і візуальних даних не представлено.

В багатьох випадках кількість видалених клонів відповідає кількості доданих, що зображено на рис. 1–4. Інформація, яка дозволяє зробити висновок чи були будь-які клони додані або видалені, представлена різницею між двома цифрами. Іншим спостереженням є те, що доля блоків з повторами в кодовій базі відповідної системи не залежить від більшості комітів. Фактично, лише під впливом одного коміту змінилася загальна кількість клонів в системах Rippled і OpenJDK, тоді як у випадку Tensorflow та Kooboo, два та чотири коміти видалили/додали клони, відповідно. Додатково були досліджені вихідні дані МНІДП для комітів, стосовно кількості виявлених клонів, для яких виявлена кількість блоків з повторами та надлишковостями здається більшою (наприклад, коміт 8 для OpenJDK). У подібних випадках, більшість зареєстрованих клонів, які зазвичай включені до багатьох файлів системної кодової бази, відповідають блокам коду/коментарям. Таким прикладом може бути запис в перших рядках деяких вихідних файлів фіксованої інформації, яка стосується ліцензій.

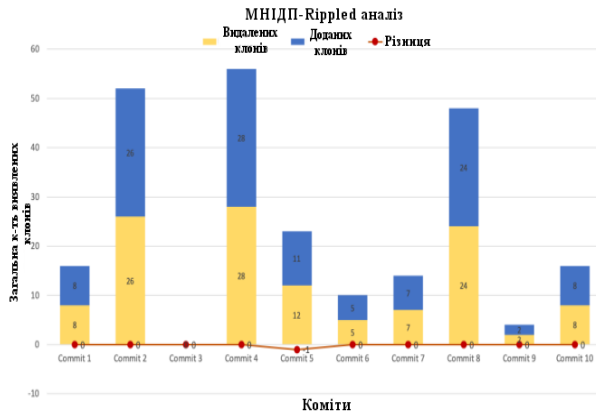


Рис. 1. Виявлення клону для Rippled

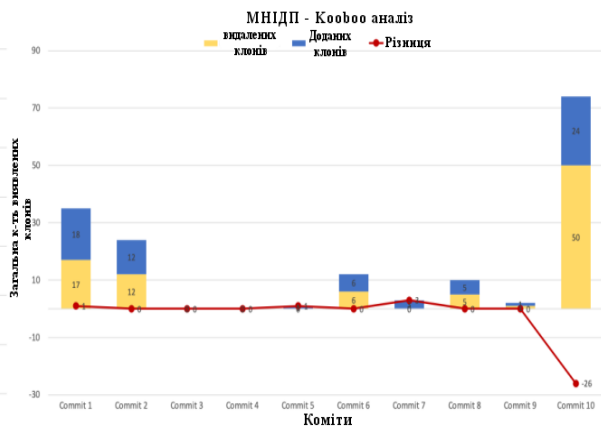


Рис. 2. Виявлення клонів для Kooboo

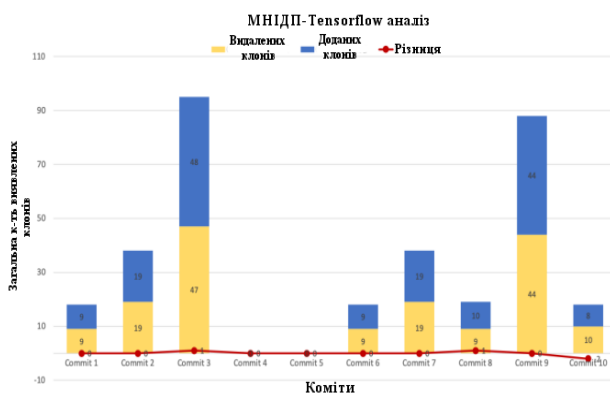


Рис. 3. Виявлення клонів для Tensorflow

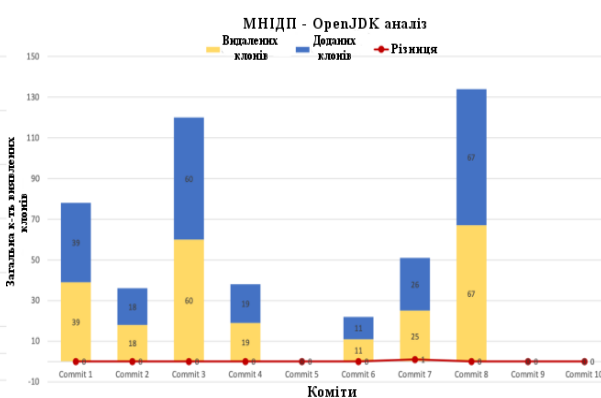


Рис. 4. Виявлення клону для OpenJDK

Доцільним став розгляд подальшого розширення та покращення детектора МНІДП, застосовуючи метод оцінки подібності найближчого сусіда – локально-чутливе хешування (ЛЧХ) [4]. Алгоритм пошуку найближчих сусідів на сьогодні є найбільш популярним ймовірнісним методом, призначеним для пониження розмірності багатовимірних даних. Тобто пошук, наприклад, подібних документів виявляється досить простим. Базуючись на метриці подібності проводиться порівняння кожного документу з будь-яким іншим документом. При тому, що такий грубий підхід добре працює при невеликих об'єднаннях документів, але виникають проблеми з поганим масштабуванням через вимоги до часу. По мірі того, як збільшується кількість документів такі вимоги зростають квадратично [5]. Значне скорочення обчислювального часу, потрібного для процесу пошуку відбувається з використанням наближених схем, що базуються на основі локально-чутливого хешування. Основна ідея ЛЧХ полягає в використанні різних хеш-функцій для проведення хешування декілька раз базових точок даних. При цьому буде гарантуватися, що подібні елементи мають більший шанс зустрітися та опинитися в одному хеш-сегменті, на відміну від різнорідних елементів [4]. Тільки тоді перевірку на подібність проходять елементи, які і потрапили в хеш-сегмент, вони також відомі як пари кандидатів.

Існує велика кількість різноманітних схем локально-чутливого хешування, придатних для використання. Конкретна схема ЛЧХ представлена на рис 5.

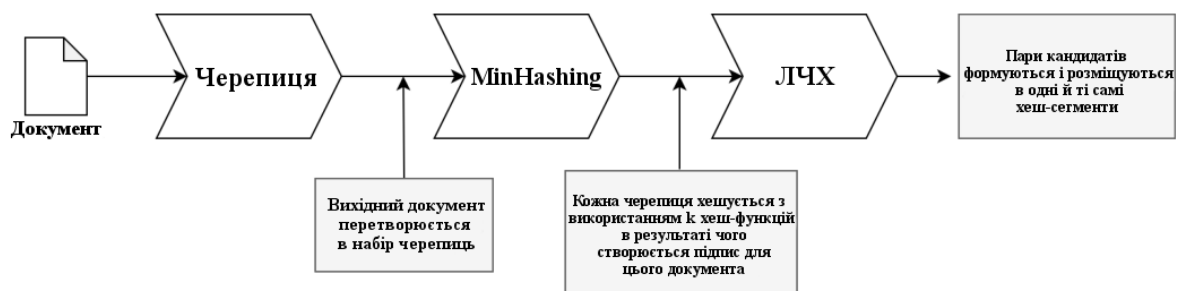


Рис. 5. Підоперації локально-чутливого хешування

Складається схема ЛЧХ з трьох основних підоперацій:

Черепиця (Shingling). Відбувається перетворення документа в набір k -черепиць. Він може бути будь-яким від простих підрядків довжини k до комбінації з k слів. На ймовірність виявлення збігів буде впливати вибір того, що приймається за черепицю. Якщо черепицею виступає 1 символ, то виявлення збігів в іншому документі буде значно вище, ніж знайти збіг з черепицею більшої довжини.

MinHashing. Після того, як на попередньому кроці були отримані набори, вони можуть виявитися досить об'ємними, тому порівняння стане неефективним. Для часткового вирішення проблеми завдяки MinHashing відбувається перетворення черепиць в менші представлення фіксованої довжини – сигнатуру. Потім коефіцієнт Жаккара [6] використовується не до набору черепиць, а до елементів генерованого підпису. Збереження інформації набору в максимально можливому ступені, забезпечується генерованими таким чином підписами. Однак при застосування подібного кроку розрахунок точної подібності між двома файлами стає неможливим, оскільки відбувається втрата інформації. Подібність в цьому разі буде розраховуватися базуючись на оцінці, яка може призвести до точних результатів. З урахуванням всіх обставин, для генерування підпису, який буде являти собою документ, проводиться хешування кожного набору за допомогою k хеш-функцій. Для кожної з цих хеш-функцій обирається мінімальне значення хеш-функції. Для прикладу, отримується підпис із півсотнею значень MinHash на основі 50 випадкових хеш-функцій. Звідси виходить, що більша ймовірність зіткнень і більший рівень помилок буде наслідком використання меншої кількості застосованих хеш-функцій.

ЛЧХ. За допомогою MinHashing прибирається «бич розмірності», який супроводжує набори черепиць. Весь процес стає неефективний через необхідність порівняння кожного підпису з іншим будь-яким підписом. Ось тут знаходить своє застосування в останньому кроці конвеєра ЛЧХ. Метод, який використовується на цьому кроці носить назву бандінгу або окільцювання. В матриці розміщується k хеш-значень для кожного документу, потім відбувається розбиття матриці на b смуг, які складаються з g рядків. Тобто при використанні дванадцяти хеш-функцій розбиття проводиться на чотири смуги по три рядки. Потім при появі нового документу $D_{\text{нов}}$ потребується визначити, чи відбувається утворення пари кандидатів з іншим документом. Тоді іде перегляд кожної смуги та виявлення документів, маючих однакові значення MinHash в кожному рядку цієї смуги. При знаходженні смуги, в якій всі рядки збігаються, буде продовжене повне порівняння між цими документами. Вирішальним являється вибір кількості смуг та рядків, оскільки він становить поріг подібності, над яким вважається, що два документи однакові.

Однак в ході дослідження виявилось, що підхід, який спирався на ЛЧХ не відповідає характеристикам вихідного підходу, хоча присутня можливість для майбутніх досліджень для вивчення можливих покращень. Увага приділяється не тільки розробці мовно-незалежного інкрементного детектора повторів і оцінці його ефективності та продуктивності, а також для забезпечення можливості подальшого обслуговування програмної системи, ідентифікації та видалення блоків з кодом, який дублюється, для сприяння виявленню клонів. Усування недоліків, які виникають через існування блоків з повторами та надлишковостями стає можливим завдяки рефакторингу програмного коду. Проводиться подібний рефакторинг вручну або автоматично, після чого кодова база набуває більшої перспективності.

При зосередженні уваги на конкретній мові програмування (особливо на такій популярній як Java [7]) виникає змога для проведення глибокого та детального виявлення повторів та надлишковості в програмному коді. Більш складні клоновані частини коду є можливість знайти на прикладі семантично схожих блоків коду з повторами. При цьому проводиться застосування різних методів, спроможних виявити клони блоків програмного коду, таких як: на основі токенів, на основі дерев, на основі графів і т.п. Пошук чи створення аналізатора для менш популярних мов стає дуже складною задачею, так як SIG не має обмеження стосовно мов програмування, які підтримуються. Тому дослідження було сфокусовано на мовно-незалежних детекторах, створення яких можливе тільки з використанням текстових методів.

Методи інкрементного виявлення блоків з повторами та надлишковостями в програмному коді, з'явилися через необхідність вирішувати питання ремонтпридатності, пов'язані з дублюванням програмного коду, у поєднанні з бажанням проводити багаторазовий запуск процесу виявлення фрагментів з клонами. Для більшості з існуючих подібних методів виникає потреба в мовному синтаксичному аналізаторі, а саме компоненту, який автоматично виключає можливість мовної незалежності для відповідних запропонованих детекторів клонів. Отже, мови програмування, не можуть бути проаналізовані в контексті виявлення блоків з повторами та надлишковостями, оскільки для них пошук або створення синтаксичного аналізатора є складною задачею.

Однією з характеристик запропонованих інкрементних детекторів являється те, що вони не видають повний сніпшот усіх блоків з повторами та надлишковостями (клонів) в кодовій базі, а дають лише клони, які при кожній перевірці коду додавалися або видалялися. Для вирішення проблеми існують наступні варіанти:

1. Введення логіки керування клонами. Була б можливість агрегації клонів від початку кодової бази (або перевірки, коли всі блоки з повторами були відомі) до потрібної перевірки, переглядаючи ті, які були додані або видалені.

2. Введення параметру, який використовуючи кожний окремий файл в кодовій базі, дозволив би проводити запит індексу. З урахування того, що всі файли системи мають пройти через конвеєр виявлення, який згадувався в даному дослідженні, то на подібне рішення буде витрачено дуже багато часу.

Два запропонованих інкрементних детектори повторів та надлишковостей не порівнювалися з існуючими сучасними інкрементними методами. При використанні запропонованого МНІДП проводилося оцінювання продуктивності та вивчення її у порівнянні з сучасним підходом SIG для виявлення клонів. Також для покращення продуктивності вивчалася можливість підходу заснованого на ЛЧХ.

Метою даного дослідження було визначення способу створення мовно-незалежного детектора повторів на надлишковостей програмного коду та дослідження, яку інформацію має бути збережено, для того, щоб детектор працював інкрементно (покроково). Для цього був модифікований вихідний алгоритм Хаммела та дослідили використання ЛЧХ у спробі розширити та покращити вихідного підходу. В процесі роботи виявлено, що для досягнення мовної незалежності, при цьому задовольняючи вимоги, встановлені на початку цього дослідження, можна використовувати проміжне представлення модифікованого «Індексу клону».

Висновки. В ході експериментів також встановлено, що підхід МНІДП виявився набагато швидший, ніж очікувалося, при цьому залишаючи обмежені можливості для подальшого покращення. Останнє пройшло перевірку в ході спостереження за продуктивністю реалізації, заснованої на ЛЧХ, яка працювала гірше в обумовленій формі. Враховуючі всі аспекти, в контексті даного дослідження, було побудовано мовно-незалежний інкрементний детектор повторів, заснований на підході Хаммела та ін. [3] та розширивши за допомогою ЛЧХ. Але в контексті вихідного алгоритму потрібні додаткові дослідження для вивчення потенціалу підходу на основі ЛЧХ.

Крім цього, іншою метою даного дослідження було з'ясування адекватності роботи такого поетапного підходу у порівнянні з традиційним детектором комерційного рівня, наприклад, вбудованим в інструмент SAT SIG. Для цього було обрано набір даних з п'яти систем і проведено запуск SAT для кожної з них, з наступним вимірюванням часу, необхідного для виявлення блоків з повторами та надлишковостями. Отримати результати аналізу SAT для самих великих та складних систем нашого інформаційного фонду не вдалося, через те, що інструмент не зміг їх обробити. Однак, для менших систем все ж таки дані аналізу були отримані. У порівнянні з вимірюваннями інкрементного детектора, коли процес виявлення повторюється для серії комітів, результати вказують на значне покращення накопиченого часу виявлення клонів. Тобто, якщо б компанія SIG використала запропонований підхід, то це вплинуло на економію часу та ресурсів. Підґрунтям для можливої інтеграції запропонованих підходів в рамках моделі ремонтпридатності (DMM – Delta Maintainability Model) виступає те, що вони мають здатність виявляти блоки з повторами та надлишковостями поза контекстом коміту [8].

References

1. Bellon S., Koschke R., Antoniol G., Krinke J., Merlo E., Comparison and evaluation of clone detection tools. *IEEE Transactions on software engineering*, 33(9):577–591, 2007.
2. Li Z., S. Myagmar S., Zhou Y., Cp-miner: Finding copy-paste and related bugs in large-scale software code. *IEEE Transactions on software Engineering*, 32(3):176–192, 2006.
3. Hummel B., Juergens E., Heinemann L., Conradt M., Indexbased code clone detection: incremental, distributed, scalable. In 2010 IEEE International Conference on Software Maintenance, pages 1–9. IEEE, 2010.
4. Indyk P., Motwani R., Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality. In *Proceedings of the thirtieth annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 604–613, 1998.
5. Beyer K., Goldstein J., Ramakrishnan R., Shaft U., When is “nearest neighbor” meaningful? In *International conference on database theory*, pages 217–235. Springer, 1999.
6. Broder A., On the resemblance and containment of documents. In *Proceedings. Compression and Complexity of SEQUENCES 1997 (Cat. No. 97TB100171)*, pages 21–29. IEEE, 1997.
7. Meyerovich L., Rabkin A., Empirical analysis of programming language adoption. In *Proceedings of the 2013 ACM SIGPLAN international conference on Object oriented programming systems languages & applications*, pages 1–18, 2013.
8. di Biase M., Rastogi A., Bruntink M., van Deursen A., The delta maintainability model: measuring maintainability of fine-grained code changes. In 2019 IEEE/ACM International Conference on Technical Debt (TechDebt), pages 113–122. IEEE, 2019.

УДК 004.43:004.8

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-9

КРИВИЙ В. М., ЯШИНА О. М.,
РАДЕЛЬЧУК Г. І., ЛИСЕНКО С. М.
Хмельницький національний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАДИГМ ПРОГРАМУВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті наведено результати досліджень різних парадигм програмування та мов, що підтримують ці парадигми, на предмет наявності інструментарію для розробки штучного інтелекту. Проведена оцінка зручності їх використання, аналіз сфер їх поширеності на ринку розробки програмного забезпечення та їх ефективність.

Ключові слова: штучний інтелект, парадигма програмування, програмне забезпечення, машинне навчання, нейронна мережа.

V. KRYVYI, O. YASHYNA, G. RADELCHUK, S. LYSENKO
Khmelnytskyi National University

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROGRAMMING PARADIGMS IN THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Today, with the growing popularity and demand for technologies of artificial intelligence, machine learning and neural networks, the question of choosing effective tools for their development and integration into software systems becomes relevant. With the progress of computer hardware, creating special programming languages and appearing of libraries that simplify the development and use of neural networks, artificial intelligence is no longer something futuristic and frightening. It is now a fairly flexible and widespread technology that is developing quickly. And on the one hand, it is gradually being introduced into our lives to perform those tasks that were previously unavailable or extremely difficult for the computer. On the other hand, artificial intelligence is not yet advanced enough to be called a completely reliable tool and cannot replace humans in many areas of their activity, so it is mostly developing for specific tasks such as digital content processing, data analysis, vehicle piloting, simulation of character behavior in games, etc. But as in the work with any other technologies in programming, we are interested in the selection of software tools and paradigms that allow us to effectively design and develop systems based on artificial intelligence.

This article presents the results of research on different programming paradigms and languages that support these paradigms, for the availability of tools for the development of artificial intelligence. It evaluates the ease of use, analyzes the areas of their prevalence in the software development market, and their effectiveness.

Keywords: artificial intelligence, programming paradigm, software, machine learning, neural network.

Вступ. Постановка проблеми. Сьогодні, із зростанням популярності та попиту на технології штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання та нейронних мереж, актуальним стає питання вибору ефективних інструментів для їх розробки та інтеграції у програмні системи. З розвитком комп'ютерного обладнання та появою бібліотек, які спрощують розробку та використання нейронних мереж, штучний інтелект уже не є чимось футуристичним та лякаючим. Зараз це досить гнучка і поширена технологія, яка швидко розвивається. З одного боку, вона поступово впроваджується у наше життя для виконання тих завдань, які раніше були недоступними або надто важкими для виконання комп'ютером. З іншого боку, штучний інтелект ще не настільки високий, щоб його можна було назвати цілком надійним інструментом. Він не може замінити людей у багатьох сферах їх діяльності, тому здебільшого розробляється для конкретних завдань, таких, наприклад, як обробка цифрового вмісту, аналіз даних, пілотування транспортних засобів моделювання поведінки персонажа в іграх тощо. У цьому зв'язку, як і при роботі з будь-якими іншими технологіями програмування, особливий інтерес представляють парадигми програмування, які дозволяють ефективно розробляти програмні системи на основі ШІ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основою дослідження є праці відомих авторів та науковців у сфері програмування ШІ, таких як П. Грем, Д. Маккарті, І. Братко, П. Джоші та ін. Ми будемо аналізувати розробку штучного інтелекту на основі парадигм функціонального, імперативного, логічного та об'єктно-орієнтованого програмування, досліджуючи такі мови програмування як Prolog, Haskell, Python, Java, JavaScript, C#, F# та ін.

Метою роботи є: порівняльний аналіз різних парадигм та мов програмування, що підтримують ці парадигми, на предмет їх ефективності та зручності при розробці штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. Парадигма програмування – це сукупність ідей та понять, які визначають стиль написання комп'ютерної програми (підхід до програмування, спосіб мислення розробника програми). Іншими словами, це концептуалізація, яка визначає організацію обчислень та структурування роботи, яку має виконувати комп'ютер [1].

Основними парадигмами, що використовуються при розробці штучного інтелекту, є парадигми функціонального (ФП), логічного (ЛП), імперативного (ІП) та об'єктно-орієнтованого (ООП) програмування. Для дослідження цих парадигм знадобиться розгляд їх використання у конкретних мовах програмування, які підтримують ці парадигми, та роботи з ними при розробці ШІ.

Методологія даного дослідження полягає у використанні наступних критеріїв порівняння парадигм та мов програмування, що використовують ці парадигми:

- концепція парадигми та її пристосованість до задач, пов'язаних з розробкою ШІ;
- поширеність на ринку розробки програмного забезпечення (ПЗ) зі штучним інтелектом;
- можливість та легкість застосування у прикладних програмних системах;
- швидкість вирішення задачі.

Кожна парадигма програмування є лише теоретичною і концептуальною складовою процесу програмування, тому для їх оцінки за конкретними критеріями ми будемо не просто розглядати парадигми самі по собі, а їх конкретну реалізацію у мовах програмування, оскільки нас цікавлять не тільки теоретичні, але й практичні аспекти, з якими стикатиметься розробник програмного коду при вирішенні широкого спектру задач.

На сьогодні більшість широкоживаних мов програмування на ринку розробки програмних систем (таких як Python, JavaScript, C#, C++, Java та ін.) були розроблені на основі ООП- та ІП-парадигм, незалежно від того, чи є вони інтерпретованими чи компільованими. Імперативний стиль написання коду визначає програму як сукупність даних, що визначають її стан, і покрокових інструкцій, що змінюють цей стан. А об'єктно-орієнтований аспект цих мов спонукає розробника програмного коду об'єднувати ці частини коду у класи, які можуть використовуватись багаторазово, наслідувати один одного, мати зв'язки з іншими класами тощо. З моменту появи мови C++ об'єднання імперативного та об'єктно-орієнтованого стилю у мовах програмування стало трендом і залишається таким до сьогодні.

Причини такого явища є очевидними – послідовні інструкції мови імперативного програмування можна набагато легше і ефективніше конвертувати у машинний код, оскільки він також є послідовністю інструкцій. Більше того, такий підхід набагато легше пояснити початківцю у програмуванні, і з ним легше уявити процес вирішення прикладної задачі, оскільки спосіб, який полягає у заданні послідовності дій для досягнення цілі, дуже наближений до реального життя. Програма стає схожою на кулінарний рецепт, де над початковими інгредієнтами крок за кроком проводяться деякі дії, що змінюють їх стан, доки ті не перетворяться у готову страву. Так само просто можна зрозуміти і принцип ООП, оскільки інформація про будь-який реальний чи абстрактний об'єкт розглядається в сукупності, як одна структурна одиниця, над якою визначено множину дій. Наприклад, дія «Розігрів» над об'єктом «Інгредієнт» змінює дані про «Температуру», «Смак» або «Колір» останнього.

Таким чином, можна зробити висновок, що процес програмування прикладних програмних систем на основі парадигм ІП та ООП є набагато простішим та ефективнішим, оскільки він здається «дуже логічним» з точки зору людини, і при цьому наближений до принципів виконання програм самим комп'ютером. Це все і обумовлює той факт, що ці парадигми застосовні до більшості мов програмування. Але чи достатньо ефективною та зручною є розробка штучного інтелекту за принципами, заснованими на цих парадигмах?

Як відомо, логіка роботи електронно-обчислювальних пристроїв (що обумовлено фізичними аспектами їх роботи), а також більшості мов програмування, є булевою, тобто будь-яке твердження у них представлене у вигляді «істини» (True) або «хибності» (False). Цей принцип можна без проблем застосовувати у математиці, де потрібне чітке визначення результату, чітке визначення істинності. Наприклад, можна однозначно описати істинність твердження «число X є парним», описавши алгоритм вирішення такої задачі в імперативному стилі наступним чином: якщо залишок від ділення X на 2 дорівнює 0, то твердженню присвоюється «істина», в іншому випадку – «хибність». Все, що треба знати програмі для вирішення такої задачі, – це саме число X. Але у реальному житті «природньому» інтелекту доводиться виконувати набагато складніші завдання, для яких буває дуже складно або майже неможливо описати чітку логіку рішення, наприклад:

Чи є підсудний «X» винним?

Чи посміхається людина на фотографії?

Чи належить силует, який ми бачимо перед собою, небезпечному хижаку?

Перевірка таких тверджень може відбуватись при дуже різних наборах вхідних даних, які інколи взагалі не дають можливості знайти однозначний результат. Причому, при описі чіткого математичного алгоритму доводиться враховувати і кожну варіацію, і діапазон даних, що навіть у випадку достатньо простих задач може змусити нас збільшити об'єм вихідного коду в десятки, сотні і навіть тисячі разів. Тому, замість того, щоб розробляти рішення таких складних завдань на основі алгоритмічної логіки, їх часто проєктують на основі принципів роботи біологічного розуму, а саме – через використання нейронних мереж та машинного навчання. Завдяки прогресу у швидкодії та можливостях комп'ютерних комплектуючих, а

також наявності у більшості популярних мов на основі ООП та ІП спеціалізованих бібліотек, такий спосіб розробки ІІІ застосовується все частіше. Але чи існують парадигми, які усувають недоліки попередніх при розробці штучного інтелекту?

Розглянемо парадигму логічного програмування на основі мови Prolog. Prolog – це мова програмування, зосереджена навколо невеликого набору основних механізмів, включаючи зіставлення зі зразком, деревоподібне представлення структур даних та автоматичний перебір з поверненнями. Цей обмежений набір засобів утворює дуже потужне та гнучке середовище програмування. Prolog особливо добре підходить для вирішення завдань, в яких розглядаються об'єкти (зокрема, структуровані об'єкти) та відношення між ними. Зокрема, засобами мови Prolog зовсім не складно виразити просторові зв'язки між об'єктами, наприклад, вказати, що синя куля знаходиться за зеленою. Настільки ж просто можна визначити загальніше правило: якщо об'єкт *X* знаходиться ближче до спостерігача, ніж об'єкт *Y*, а *Y* – ближче, ніж *Z*, то *X* має бути ближче, ніж *Z*. Після цього система Prolog отримує можливість формувати міркування про просторові зв'язки та їх сумісність із загальним правилом. Завдяки таким особливостям Prolog стає потужною мовою для розробки штучного інтелекту та нечислового програмування в цілому [2].

Таким чином, логічну парадигму у мові Prolog можна назвати сильною стороною при розробці систем штучного інтелекту. Вона дозволяє розглядати програмування як опис пошуку логічного висновку на основі існуючих фактів. При цьому програмний код не повинен однозначно характеризувати шляхи до пошуку рішення за принципами булевої логіки, де будь-яке твердження визначається лише як «істина» або «хибність». В цьому і полягає робота рішень на основі штучного інтелекту, таких як експертні системи, обробка та аналіз мовлення, доведення теорем, трасування та евристичні оцінки, оскільки усі перераховані задачі здебільшого засновані на аналізі фактів, пошуку зв'язків між ними та синтез висновку. Мова Prolog дозволяє вирішувати такі задачі набагато швидше, ніж інші мови, оскільки логічна парадигма, яку вона підтримує, і є концепцією, призначеною для їх рішення (наприклад, перший чатбот ELIZA був розроблений з використанням Prolog для обробки конструкцій мовлення [3]).

З іншого боку, концепція логічного програмування в Prolog є набагато складнішою для розуміння і освоєння в порівнянні з парадигмами функціонального, імперативного чи об'єктно-орієнтованого програмування, що кардинально відрізняє цю мову від більшості популярних мов програмування. Тому її головна перевага, що полягає у написанні програмного коду як «дерева досягнення висновку» (а не «алгоритму» у випадку імперативної парадигми), значно ускладнює застосування у прикладному програмуванні, коли кожна програма розглядається як покроковий набір інструкцій. Це робить Prolog малопоширеною мовою програмування у широкому колі розробників, тому ця мова здебільшого застосовується в академічних або дослідницьких цілях.

Таким чином, логічна парадигма, яка хоч і забезпечує потужні механізми розробки ІІІ, але демонструє свої суттєві концептуальні недоліки при розширенні спектру та специфіки завдань, які потрібно вирішувати. Але що, якщо якась інша парадигма може об'єднати принципи нечіткої логіки з логічної парадигми, і при цьому дозволить мові програмування набагато ширше використовуватись як прикладний інструмент? Виходом може стати функціональна парадигма програмування.

Функціональна парадигма довгий час трималась осторонь сфери прикладної розробки. Як і у випадку з логічним програмуванням, імперативний спосіб написання коду випереджає її як більш зрозумілий та наближений до людського сприйняття принцип опису алгоритму виконання завдань. А оскільки протягом довгого часу більшість мов функціонального програмування виконувались інтерпреторами і, отже, були достатньо повільними, то й не дивно, що їх імперативні та об'єктно-орієнтовані компільовані аналоги, такі як C, C++ або Java, завоювали значно більшу популярність серед розробників.

Однак, завдяки розвитку комп'ютерної техніки, можна говорити про нівелювання вказаного недоліку, оскільки сьогодні, наприклад, компілятор GHC (Glasgow Haskell Compiler) для мови Haskell створює виконуваний код, який не поступається за ефективністю програмам, розробленими засобами мов C чи C++ [4].

У зв'язку зі стрімким зростанням машинного навчання і великих даних ФП стало набирати популярність через простоту розпаралелювання чистих функцій. Функціональна парадигма також спрощує відстеження, тестування та обслуговування коду для задач аналізу даних та робочих процесів, що створює передумови для її активного використання у найближчому майбутньому.

Однією з найпоширеніших функціональних мов є Haskell. Це винятково функціональна мова, що базується на лямбда-численні. Вона не є надто популярною, але широко використовується як в дослідженнях, так і в реалізації комерційних проєктів.

У мові Haskell, як і в більшості мовах функціонального програмування, не визначається чіткий порядок виконання обчислень, – лише декларуються залежності між даними, а порядок виконання визначається транслятором. Такий підхід дуже схожий на концепцію логічного програмування в Prolog. Більше того, Haskell, так само як і Prolog, допускає програмування нечіткої логіки і нечіткої математики, формування логічного висновку. Опис роботи з такими поняттями на основі функціональної парадигми

наведений у [4]. Автор називає парадигму ФП «найбільш пристосованою для вирішення завдань штучного інтелекту».

З усвідомленням переваг функціональної парадигми над імперативним стилем чимало мов програмування були розширені функціональними елементами. Наприклад, у мові Python з'явилися такі оператори з Haskell, як `map`, `filter`, `lambda`, `reduce`. У мові C# з'явилися `LinQ` та лямбда-вирази. Тому популярні (здебільшого імперативні та об'єктно-орієнтовані мови) розвиваються в бік мультипарадигмового програмування, об'єднуючи простоту імперативного стилю написання коду з декларативністю функціонального програмування. Оскільки парадигми програмування утворюють висхідну лінію концептуальності, то й не дивно, що більшість сучасних мов програмування є, по суті, мультипарадигмовими (табл. 1).

Таблиця 1

Мультипарадигмовість мов програмування

Мови	Парадигми			
	Функціональна	Логічна	Імперативна (процедурна)	Об'єктно-орієнтована
Ада	–	–	+	+
C	–	–	+	–
C++	–	–	+	+
C#	–	–	+	+
Java	–	–	+	+
Haskell	+	–	+	–
Common LISP	+	–	+	+
Python	–	–	+	+
Prolog	–	+	–	–
SmallTalk	+	–	+	+
JavaScript	–	–	+	+
F#	+	–	+	+

Висновки. У дослідженні виконано порівняльний аналіз різних парадигм та мов програмування, що підтримують ці парадигми, на предмет їх ефективності та зручності при розробці штучного інтелекту. Проведена оцінка зручності їх використання, аналіз сфер їх поширеності на ринку розробки ПЗ та їх ефективності. Встановлено, що жодна парадигма не вирішує завдань розробки ШІ найлегшим чи найефективнішим способом. Так само не існує ідеальної мови для ШІ – кожна має свої переваги та недоліки при вирішенні певних задач із різних предметних областей. Тому більшість відповідних рішень мають базуватись на комбінуванні (поєднанні) декількох технологій та парадигм, які включають різні варіанти для реалізації бажаної функціональності та досягнення високої ефективності.

References

1. Van Roy P. Programming Paradigms for Dummies: What Every Programmer Should Know [Online] / P. Van Roy // ResearchGate. – Available: https://www.researchgate.net/publication/241111987_Programming_Paradigms_for_Dummies_What_Every_Programmer_Should_Know
2. Bratko I. Algoritmyi iskusstvennogo intellekta na yazyike PROLOG; 3-e izdanie: Per. s angl. / I. Bratko. – M. : Izdatelskiy dom "Vilyame", 2004. – 640 s.
3. Weizenbaum J. ELIZA – A Computer Program For the Study of Natural Language Communication Between Man And Machine / J. Weizenbaum // Communications of the ACM. – 1966. – Volume 9(1). – P. 36–45.
4. Dushkin R. V. Funktsionalnoe programmirovaniye na yazyike Haskell / R. V. Dushkin. – Izd-vo «DMK Press», 2008. – 609 s.

УДК 681.514:621

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-10

ГАРАСИМІВ В. М., ГАРАСИМІВ Т. Г.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Інститут інформаційних технологій

ВЗАЄМОДІЯ БАЗИ ДАНИХ SCADA-СИСТЕМИ ІЗ ЗОВНІШНІМ ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Метою статті є огляд особливостей взаємодії SCADA-системи керування компресорною станцією із зовнішнім забезпеченням системи контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача 16ГЦ2-395/53-76С на компресорній станції «Долина». Обмін даними між розробленим програмним забезпеченням та SCADA-системою реалізується за допомогою використання технології Dynamic Data Exchange, яка представляє собою клієнт-серверну архітектуру.

Дане програмне забезпечення створене в математичному середовищі Matlab і включає ідентифікацію параметрів математичної моделі відцентрового нагнітача, побудову його емпіричної моделі, обчислення зміни узагальнених оцінок технічного стану та експертну оцінку технічного стану нагнітача, яка дає можливість оцінити поточний технічний стан відцентрового нагнітача без його зупинки, що забезпечує попередження появи несправностей та зменшить затрати на його технічний огляд. Вхідними експериментальними даними є значення тиску на вході та виході нагнітача, перепад тиску на конфузори, частоти обертання робочого колеса, температури газу на вході та на виході нагнітача. Вихідними даними є значення об'ємної продуктивності нагнітача, яка залежить від вхідних параметрів та геометричних розмірів його проточної частини. Дані збиралися під час роботи ГПА-Ц1-16С/76-1 на протязі двох місяців: листопаду 2014 року та лютого 2015 року.

Інтеграція розробленого програмного забезпечення в існуючу систему керування роботою компресорною станцією передбачає створення спеціального додатку, написаного на об'єктно-орієнтованій мові програмування Delphi. Зв'язок даного додатку із програмним середовищем Matlab здійснюється з використанням технології COM, а обмін даними передбачає використання функцій PutFullMatrix і GetFullMatrix.

Ключові слова: ідентифікація, SCADA-система, технологія Dynamic Data Exchange, клієнт-серверна архітектура, емпірична модель, технічний стан, експериментальні дані, технологія COM.

V. HARASYMIV, T. HARASYMIV

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Institute of Information Technologies

THE SCADA SYSTEM DATABASE INTERACTION WITH EXTERNAL SOFTWARE

The purpose of this article is description the interaction features of compression station control SCADA system with the external software of the centrifugal compressor volute technical state estimation for compressor 16ГЦ2-395/53-76C of the compressor station "Dolyna". The data exchange between the developed software and the SCADA system is implemented using Dynamic Data Exchange technology, which has a client-server architecture.

This software is created in the mathematical environment Matlab and includes parameters identification of the centrifugal compressor mathematical model, the creation of its empirical model, calculation changes in the technical condition estimations and the expert assessment of the compressor technical state, which allows to estimate the current compressor technical state during its operation and it prevents the faults appearance, reduces the technical control cost. The output data values are the compressor volumetric flow rate values, which depend on the input parameters and the flow rate geometric dimensions. Experimental parameters were collected the operation of the gas pumping plant C1-16C/76-1 for two months: November of the year 2014 and February of the year 2015.

The developed software integration into the existing compressor station control system involves the special application creation written in the object-oriented programming language Delphi. This application is connected to the Matlab software environment using COM technology, and data exchange involves the use of PutFullMatrix and GetFullMatrix functions.

Key words: identification, SCADA system, Dynamic Data Exchange technology, client-server architecture, empirical model, technical state, experimental parameters, COM technology.

Вступ. Проблема адекватної та оперативної оцінки технічного стану відцентрового нагнітача (ВЦН) газоперекачувального агрегата (ГПА) має важливе економічне та технічне значення для зменшення непередбачених втрат паливного газу і забезпечення надійності та ефективності технологічного процесу компримування газу. На сьогодні особливої уваги приділено розробленню алгоритмам ідентифікації технічного стану ВЦН природного газу під час їхньої експлуатації, що дозволить передбачити виникнення пошкоджень, зменшити затрати та збільшити ефективність їхнього функціонування. Більшість цих алгоритмів реалізовані популярними системами комп'ютерної математики, зокрема MathCAD, Matlab, Maple, Mathematical та іншими. Прямий переніс даних алгоритмів на програмований логічний контролер чи в SCADA-систему потребує великих часових затрат, що пов'язується з особливостями мов програмування як і програмного забезпечення, так і засобів автоматизації. Тому в даній роботі показано взаємодію існуючої бази даних SCADA-системи та програмний модуль підтримки контролю технічного стану проточної частини нагнітача, написаного на об'єктно-орієнтованій мові Delphi.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У різних літературних джерелах розглянуті різноманітні методики та алгоритми оцінки технічного стану нагнітачів за зміною їхніх геометричних

розмірів. Основи усіх методик показані у працях [1–4], де авторами розглядається вплив геометричних параметрів основних елементів нагнітачів на значення політропного коефіцієнта корисної дії, а також розраховуються коефіцієнти втрат в кожній структурній частині нагнітача. У праці [5] побудовано математичну модель двоступеневого ВЦН природного газу, яка виражає залежність його об'ємної продуктивності від значень геометричних параметрів проточної частини нагнітача та його технологічних параметрів. Автори праці [6] створили програмне забезпечення оцінки технічного стану проточної частини нагнітача на основі нечіткої логіки. Проте в даній роботі не показана взаємодія існуючої бази даних SCADA-системи із запропонованим програмним забезпеченням, що, у свою чергу, обмежує використання розробленої методики в режимі реального часу.

Постановка задачі. Програмне забезпечення оцінки системи контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача 16ГЦ2-395/53-76С виконане у програмному середовищі Matlab. Проте для того, щоб дана система функціонувала в режимі реального часу, необхідно інтегрувати дану систему в існуючу систему керування компресорною станцією. Тому в даній роботі розроблено модуль підтримки контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача із врахуванням особливостей обміну даними між SCADA-системою та запропонованим модулем.

Вирішення поставленої задачі. Розглянемо структуру системи контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача, яка показана на рис. 1.

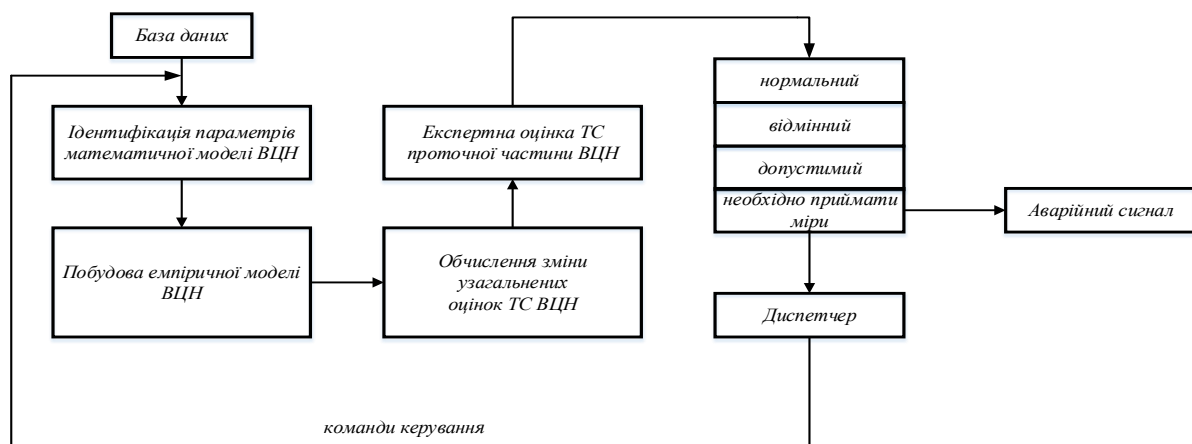


Рис. 1. Структура системи контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача

Дана система передбачає експорт даних із встановленої системи керування компресорною станцією. На КС-3 «Долина» верхній рівень керування представлений SCADA-системою Citect, розробником якої являється австралійська фірма Сі Technologies [7]. Citect орієнтована на реалізацію архітектури клієнт-сервер і включає п'ять функціональних модулів: сервер вводу-виводу (забезпечує передачу даних між фізичними приладами вводу-виводу і другими модулями Citect), клієнт візуалізації (відображення даних, які надходять від інших модулів Citect, а також керування виконанням команд оператора, сервер алармів (відслідковує дані, порівнює їх з граничними, перевіряє виконання заданих наперед умов і відображає аларми на відповідному вузлі візуалізації, сервер звітів (генерує звіти за певний час, при виникненні певної події чи за запитом диспетчера, сервер трендів (збирає та реєструє трендову інформацію, дає можливість фіксувати розвиток процесу в режимі реального часу).

Обмін даними реалізується за допомогою механізму DDE (Dynamic Data Exchange), який призначений для обміну даними між різноманітним програмним забезпеченням, що використовується в Windows. Дана технологія підтримує як однократну передачу даних, так і неперервну. Механізм DDE реалізує клієнт-серверну архітектуру. В якості клієнта може виступати довільне програмне забезпечення, яке може відправляти запити серверу, а в якості сервера – програме забезпечення, яке здатне приймати запити від клієнта і відправляти дані на запит.

SCADA-система може функціонувати як DDE сервер, так і DDE клієнт. Програмне забезпечення контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача виступає в якості DDE клієнта, а SCADA-система Citect в режимі DDE сервера. Для представлення програмних блоків системи контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача в якості єдиного інтерфейса використано технологію стандарту OPC – OPC Data Acces. Вона побудована на основі технологій OLE, COM/DCOM і здійснює читання, запис та моніторинг змінних у реальному часі, які представляють собою параметри, що підлягають контролю:

- тиск на вході в ВЦН природного газу;
- тиск на виході в ВЦН природного газу;

- тиск на конфузори ВЦН;
- температура на вході ВЦН природного газу;
- температура на виході ВЦН природного газу.

Технологія OPC Data Access має клієнт-серверну архітектуру. Оскільки система контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача здійснюється в програмному середовищі Matlab, то він виступає в якості інтерфейсу “Automation”, який, як відомо, побудований на основі технології “OLE Automation”, яка дозволяє створювати запити COM-компонентам із використанням інтерпретованих мов програмування (Matlab, Maple, Mathcad, VBScript). Matlab використовує інтерфейс “OPC Automation interface” для зв’язку зі обгорткою “OPC Automation Wrapper”, яка через COM ітерфейс працює з OPC серверами. Також розрізняють інтерфейс “Custom”, який використовується для клієнтів, які розроблені на мовах програмування C або C++ [8].

Обмін даними між модулем підтримки контролю оцінки технічного стану проточної частини нагнітача реалізується за допомогою змінних типу OleVariant. Для обміну числовими даними використано функції PutFullMatrix і GetFullMatrix. Для передачі команд про виконання відповідних операцій сервером “Automation” використано функцію Execute. Для відкриття та закриття сервера “Automation” використано функції CreateOleObject і Quit.

Програма модуля підтримки оцінки технічного стану проточної частини нагнітача (рис. 2) носить назву “Main” і працює в режимі поради. За допомогою даного модуля здійснюється оцінка технічного стану проточної частини нагнітача з використанням експериментальної думки експертів та будується графік залежності об’ємної продуктивності нагнітача за поточний місяць.

При натискненні кнопки «Провести розрахунок» відбувається запуск трьох сценаріїв у відповідному порядку: KS3_ga_November (ідентифікації параметрів математичної моделі відцентрового нагнітача, яка здійснюється із використанням генетичних алгоритмів), EmpiricModel_KS3_February (побудови емпіричної моделі ВЦН), Estimation_KS3 (експертної оцінки технічного стану проточної частини ВЦН).

Технічний стан ВЦН оцінюється за узагальненими оцінками технічного стану, розрахованими авторами [6], і описується термами: «нормальний», «відмінний», «допустимий», «необхідно приймати міри». Результат $d=0,3250$ є результатом вирішення задачі нечіткого висновку і означає те, що технічний стан проточної частини нагнітача – «нормальний».



Рис. 2. Основне вікно модуля підтримки оцінки технічного стану проточної частини ВЦН

Фрагмент коду, що відповідає за ідентифікацію параметрів математичної моделі із використанням експериментальних даних за листопад 2014 року буде наступним:

```
Z:=CreateOleObject('Matlab. Application');  
Z.Execute('KS3_ga_November')
```

У цьому фрагменті Delphi-додаток ініціює сервер “Automation” і запускає на виконання потрібний сценарій. Після виконання даних команд, блок ідентифікації параметрів математичної моделі нагнітача стає самостійною процедурою.

Оцінка технічного стану проточної частини здійснюється в декілька етапів, тобто запускаються окремо файли-сценарії системи Matlab у потрібній послідовності. Для їхньої консолідації в одне ціле на базі існуючого графічного інтерфейсу використовуються засоби програмного пакету Matlab.

Після запуску основного вікна «Main» розробленого модуля запускається етап ідентифікації параметрів математичної моделі (рис. 3). На цьому етапі розраховуються параметри моделі $x_n, n = 0 \dots 4$, а також ідентифікуються значення коефіцієнта поправки на кінцеве число лопаток μ та коефіцієнта, значення якого залежить від способу обробки лопаток робочого колеса відцентрового нагнітача K_T [5]. Також під час запуску даного сценарію відображається графічне зображення зміни значень об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача після його капітального ремонту.

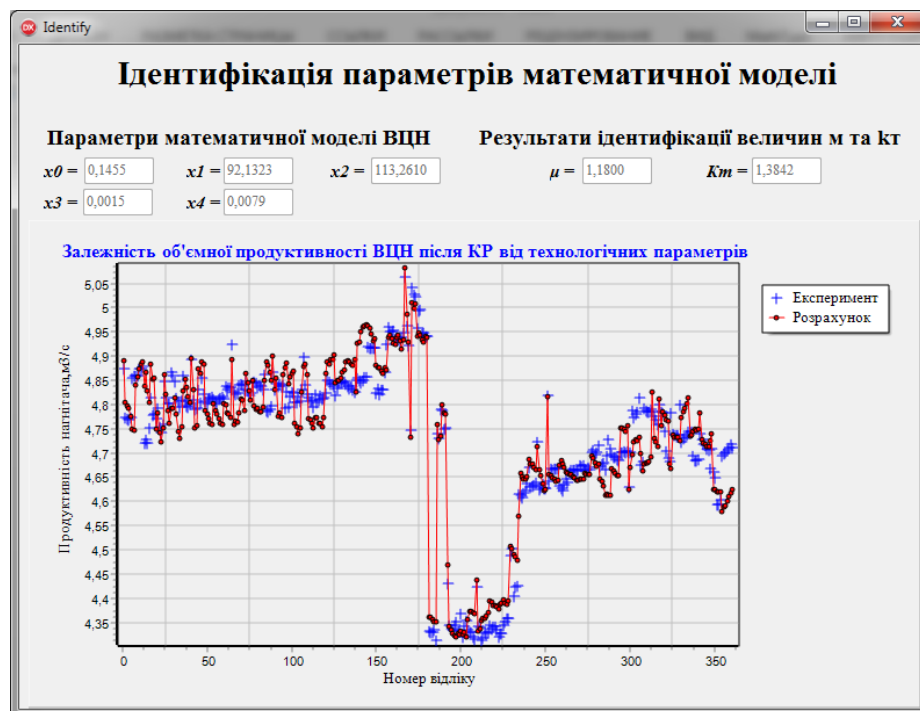


Рис. 3. Ідентифікація параметрів математичної моделі відцентрового нагнітача

Наступний етап – це запуск сценарію побудови емпіричної моделі нагнітача зі застосуванням методу групового врахування аргументів. Запишемо наступну залежність:

$$Q_j = F(\omega, T_1, T_2, P_1, P_2, P_a), \quad (1)$$

де Q_j – значення об'ємної продуктивності нагнітача, ω – кутова швидкість ротора ВЦН, T_1 – температура на вході в нагнітач, T_2 – температура на виході зі нагнітача, P_1 – тиск на вході в нагнітач, P_2 – тиск на виході зі нагнітача, P_a – значення атмосферного тиску.

Вираз (1) запишемо у вигляді наступної залежності:

$$\bar{Y} = f(X), \quad (2)$$

де where $X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1m} & x_{2m} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$ – матриця значень технологічних параметрів нагнітача,

$\bar{Y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T$ – матриця значень об'ємної продуктивності нагнітача, m – кількість досліджень, n – кількість вхідних параметрів.

Оскільки виконано $m=336$ досліджень, а кількість вхідних параметрів n рівне 6, то матриця X буде мати розмірність $[336 \times 6]$.

Загальним видом оператора до наступної ітерації є деяка функція $z = f(u, v)$, де u, v – довільна пара розв’язків попередньої ітерації, z – вектор розв’язків (вихід моделі) наступної ітерації. Перехідна функція $z = f(u, v)$ називається частковим описом, може бути лінійною, білінійною чи квадратичною:

$$\begin{aligned} z &= f(u, v) = a_0 + a_1 u + a_2 v; \\ z &= f(u, v) = a_0 + a_1 u + a_2 v + a_3 uv; \\ z &= f(u, v) = a_0 + a_1 u + a_2 v + a_3 uv + a_4 u^2 + a_5 v^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Із вхідних векторів-аргументів $x_1, x_2, \dots, x_6$ вибираємо усі можливі пари $x_i, x_j, i \neq j$ та складаємо часткові описи виду (3), тобто $y_l^1 = f(x_i, x_j), l = 1, 2, \dots, C_m^2$ і за методом найменших квадратів (МНК) на навчальній вибірці знаходяться оцінки невідомих параметрів (коефіцієнтів) $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots$. За заданим критерієм на перевірочній вибірці відбираються F кращих моделей $\hat{y}_k^1, k = \overline{1, F}$, виходи яких є аргументами-входами для формування моделей наступного ряду. Далі знаходимо мінімальне значення зовнішнього критерію серед усіх F значень критерію на першому рядуі. В якості зовнішнього критерію використовуємо критерій регулярності (4) або критерій зміщення (5), що забезпечує однозначність результатів перебирання та меншу чутливість до похибок вимірювальних даних на об’єкті [9]:

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (Y^{(i)}(B) - y^{(i)}(B))^2}{\sum_{i=1}^{N_B} Y^{(i)}(B)^2} \quad (4)$$

$$\Delta^2(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^N (y^{(i)}(A) - y^{(i)}(B))^2}{\sum_{i=1}^N (Y^{(i)})^2}, \quad (5)$$

де $y^{(i)}(A), y^{(i)}(B)$ – значення виходу моделі, обчислені відповідно на множинах експериментальних значень навчальної N_A та перевіркої N_B послідовностей.

Із векторів-аргументів $\hat{y}_k^1, k = \overline{1, F}$ попереднього r -го ряду формуються усі можливі часткові описи виду (3):

$$\hat{y}_k^{r+1} = f(y_i^r, y_j^r), l = 1, 2, \dots, C_F^2, \quad i, j = \overline{1, F}, \quad (6)$$

З використанням критерію регулярності та критерію зміщення знаходимо оцінки параметрів. Відбираємо F найкращих моделей $\hat{y}_k^{r+1}, k = \overline{1, F}$ і знаходимо $\Delta^2(B)$ або $\Delta^2(A, B)$. Провіряємо умову:

$$\Delta_m^2(B) = \min_j \Delta_j^2(B), \quad (7)$$

$$\Delta_m^2(A, B) = \min_j \Delta_j^2(A, B). \quad (8)$$

Ітераційний процес зупиняється, коли мінімальні значення (7) або (8) зовнішніх критеріїв (4) або (5) не перевищують заданого значення E , в іншому випадку – перехід до наступного ряду. У випадку зупинки в якості оптимальної моделі вибирається модель, яка відповідає значенню мінімальному значенню критерію (4) або (5) на попередньому r -му рядуі.

Високу ефективність ітераційних алгоритмів демонструють багаточисленні розв’язки практичних задач моделювання з метою прогнозу та керування. Вони підходять для великого числа вхідних даних і дозволяють будувати лінійні та нелінійні моделі.

Вікно побудови емпіричної моделі відцентрового нагнітача показано на рис. 4.

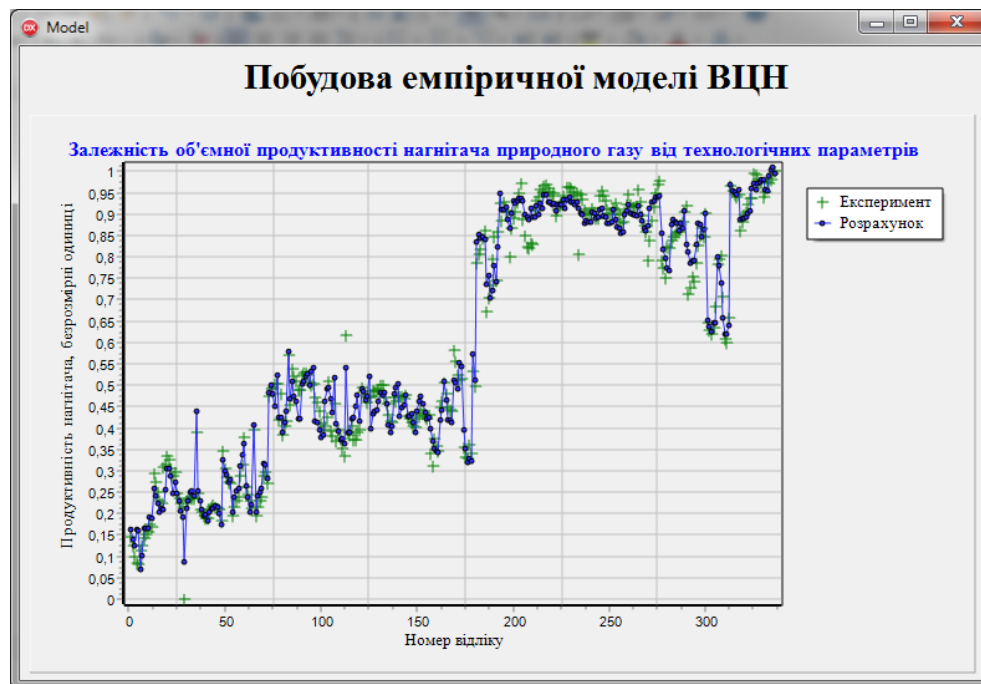


Рис. 4. Побудова емпіричної моделі відцентрового нагнітача

Щоб дізнатися значення узагальнених оцінок технічного стану відцентрового нагнітача, необхідно натиснути кнопку «Деталі», що знаходиться поряд пункту «Обчислення зміни узагальнених оцінок технічного стану» основного вікна модуля підтримки оцінки технічного стану проточної частини відцентрового нагнітача (рис. 2). Вікно «Обчислення зміни узагальнених оцінок технічного стану ВЦН» показано на рис. 5.

Рис. 5. Обчислення зміни узагальнених оцінок технічного стану

Висновок. Для оцінки технічного стану ВЦН у режимі реального часу розроблено програмний продукт підтримки задачі оцінки технічного стану його проточної частини, написаний на об'єкто-орієнтованій мові Delphi, що, в свою чергу, забезпечує візуально зрозумілий інтерфейс. Обмін даними між розробленим програмним продуктом та SCADA-системою реалізується за допомогою використання технології DDE. Програмне середовище Matlab, в якому розроблено програмне забезпечення, виступає в якості інтерфейсу «Automation» і здійснює обмін даними між Delphi-додатком за допомогою змінних типу OLEVariant. Для обміну числовими даними використано функції PutFullMatrix і GetFullMatrix.

References

1. Ris V. F. Tsentrobeznyye kompressornyye mashiny : 3-ye izd., pererab. i dop. Leningrad : Mashinostroyeniye, 1981. 351 s.
2. Ilchenko B. S. Diahnostuvannya funktsionalno-tekhnichnoho stanu hazoperekachuvальnykh ahrehativ: monohrafiya. Kharkiv : KHNAMH, 2011. 228 s.
3. Revzin B. S. Gazoturbinnyye gazoperekachivayushchiye agregaty. Moskva : Nedra, 1986. 212 s.

-
4. Kozachenko A. N. Ekspluatatsiya kompressornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov. Moskva : Neft' i gaz, 1999. 463 s.
 5. Horbiychuk M. I., Medvedchuk V. M. Metod parametrychnoyi identyfikatsiyi tekhnichnoho stanu dvostupenevoho vidtsentrovoho nahnitacha pryrodnoho hazu. Naftohazova enerhetyka. 2015. № 1 (23). S. 78–85.
 6. Harasymiv V. M., Harasymiv T. H., Moyseyenko O. V. Systema otsynyuvannya tekhnichnoho stanu protochnoyi chastyny dvostupenevoho nahnitacha pryrodnoho hazu na osnovi nechitkoyi lohiky.
 7. Yelizarov I. A., Tretyakov A. A., Pchelintsev A. N. Integrirovannyye sistemy proyektirovaniya i upravleniya: Scada-sistemy : uchebnoye posobiye Tambov : izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2015. 160 s.
 8. Hrudetsky R. YA. Vzayemodiya DELPHI-dodatkov ta prohramnoho seredovyscha Matlab. Kompyuterno-intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo. 2013. № 12. S. 18-22.
 9. Ivachnenko A. G., Muller J. A. Selbstorganisation von Vorhersagemodellen. Berlin : Veb Verlag Technic, 1984. 223 p.

УДК 620.91

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-11

МАРТИНЮК В. В.

Хмельницький національний університет

МЕТОДОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

У роботі на основі проведеного аналізу методів проведення наукових досліджень визначено, що метод багатфакторного експерименту найбільш ґрунтовно дозволяє дослідити вплив одночасно різних зовнішніх факторів на інформаційну систему. Цей метод є комплексним і дозволяє отримати статистичні дані при різних сценаріях тестування, визначити допустимі межі впливу різних зовнішніх факторів на інформаційну систему та їх різних сукупностей, а також розробити комплекс рекомендацій по експлуатації та технічному обслуговуванню інформаційної системи.

Keywords: методи проведення наукових досліджень, метод багатфакторного експерименту, інформаційна система.

V. MARTYNYUK

Khmelnitsky national university

METHODOLOGY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC RESEARCH IN INFORMATION TECHNOLOGIES

Information technologies are widely used in industry, education and everyday life. Modern life can no longer be imagined without the use of information systems. Digital technologies are widely used in the world and in Ukraine. The development of information technology requires new research and the creation of new methods of information processing, as well as new hardware for the implementation of these methods.

Improving the efficiency of research in the field of information technology depends on an effective methodology and optimal organization of research in the process of creating new methods of information processing, new algorithms and information systems. The current state of information technology development unites the process of designing and researching information systems.

The combination of design and research of information systems is very important, because when creating a new information system it is important to obtain the optimal ratio of its technical characteristics and development costs. The optimal ratio of technical characteristics and the cost of information system development determines the answer to the question of whether the goal of information system development and research of its technical characteristics has been achieved.

New developments and research in the field of information technology begin with the development of a research project that defines the purpose and objectives of development and research, as well as its technical and economic characteristics. In the process of research project implementation is a cyclical implementation of the three main stages of design and research of information systems.

In the work on the basis of the conducted analysis of methods of carrying out scientific researches it is defined that the method of multifactor experiment most thoroughly allows to investigate influence of simultaneously various external factors on information system. This method is comprehensive and allows to obtain statistics for different testing scenarios, to determine the allowable limits of the impact of various external factors on the information system and their various aggregates, as well as to develop a set of recommendations for operation and maintenance of the information system.

Keywords: research methods, multifactor experiment method, information system.

Вступ. Інформаційні технології набувають широкого застосування в промисловості, освіті та побуті. Сучасне життя вже не можна уявити без використання інформаційних систем. Цифрові технології широко використовуються в світі та Україні. Розвиток галузі інформаційних технологій вимагає проведення нових наукових досліджень та створення нових методів обробки інформації, а також нового апаратного забезпечення для реалізації цих методів [1].

Підвищення ефективності проведення наукових досліджень у галузі інформаційних технологій залежить від ефективної методології та оптимальної організації проведення наукових досліджень в процесі створення нових методів обробки інформації, нових алгоритмів та інформаційних систем. Сучасний стан розвитку інформаційних технологій об'єднує процес проектування та дослідження інформаційних систем [2].

Поєднання проектування та дослідження інформаційних систем є дуже важливим, тому що при створенні нової інформаційної системи важливо отримати оптимальне співвідношення її технічних характеристик та вартості розробки. Оптимальне співвідношення технічних характеристик та вартості розробки інформаційної системи обумовлює відповідь на запитання, чи досягнуто мету розробки інформаційної системи та дослідження її технічних характеристик [3].

Нові розробки та дослідження у галузі інформаційних технологій розпочинаються із розробки науково-дослідного проекту, який визначає мету та завдання розробки і дослідження, а також його техніко-економічні характеристики. В процесі виконання науково-дослідного проекту здійснюється циклічне виконання трьох головних етапів проектування та дослідження інформаційних систем [4].

1. Проведення процесу наукового дослідження.
2. Обробка отриманих результатів.
3. Перевірка достовірності отриманих результатів наукових досліджень.

Ці три етапи можуть циклічно повторюватися, якщо отримані результати наукових досліджень не відповідають запланованим техніко-економічним характеристикам, або в процесі перевірки достовірності отриманих результатів наукових досліджень не підтвердилась їх достовірність.

У галузі інформаційних технологій можна виділити два типи досліджень: структурні дослідження та статистичні дослідження. Структурні дослідження проводяться з метою передбачення або пояснення загальної поведінки системи на основі знань про її архітектуру, а також визначення архітектури системи на основі спостережень за її поведінкою [5].

В процесі статистичних досліджень сукупність явищ описуються змінними. В якості значення змінних використовують розподіл ймовірностей по сукупності всіх можливих явищ. Метою проведення статистичних досліджень є передбачення або пояснення явищ на основі знань розподілу ймовірностей змінних, а також оцінка властивості розподілу ймовірностей змінних зі спостережень за вибірками явищ.

Структурні дослідження базуються на гіпотезі, що навколишній світ складається із взаємодіючих систем. Кожна система є сутністю, яка може бути розкладена на компоненти, які взаємодіють, щоб створити загальну поведінку системи. Компоненти також можуть бути системами компонентів нижчого рівня. І навпаки, компоненти можна скласти в складні системи. Однією з можливих цілей структурних досліджень є передбачення або пояснення загальної поведінки системи на основі знань про її архітектуру. Інша можлива мета структурних досліджень – виявити архітектуру системи на основі спостережень за її поведінкою.

Статистичних дослідження базуються на гіпотезі, що навколишній світ – це сукупність явищ, які можна описати змінними. Значення змінної мають розподіл ймовірностей по сукупності всіх можливих явищ. Однією з можливих цілей статистичних дослідження є передбачення або пояснення явищ на основі знань про розподіл ймовірностей змінних. Інша можлива мета статистичних дослідження – оцінити властивості розподілу ймовірностей змінних зі спостережень за вибірками явищ.

Організація наукових досліджень при розробці програмного забезпечення. В процесі розробки програмного забезпечення виникає необхідність проведення наукових досліджень алгоритмів та методів обробки даних з метою покращення техніко-економічних характеристик інформаційної системи. Організацію наукових досліджень при розробці програмного забезпечення умовно можна розділити на наступні етапи [6–9].

1. Експертна оцінка.

На етапі експертної оцінки здійснюється перевірка вимог до програмного забезпечення. В результаті експертної оцінки визначаються функції програмного забезпечення, вимоги до його швидкої та апаратних ресурсів інформаційної системи для забезпечення роботи програмного забезпечення.

2. Керування проектом.

На етапі керування проектом відбувається безпосередньо розробка програмного забезпечення. Сучасне програмне забезпечення є складним продуктом, розробку якого одночасно здійснює певна кількість програмістів, що можуть об'єднуватися у групи. На етапі керування проектом важливою є взаємодія між групами програмістів для забезпечення відповідності специфікаціям програмних модулів. Складність сучасного програмного забезпечення вимагає проводити наукові дослідження нових алгоритмів та методів обробки даних. За результатами проведених наукових досліджень нових алгоритмів та методів обробки даних встановлюються недоліки розробленого програмного забезпечення.

3. Керування змінами до проекту.

На етапі керування змінами до проекту відбувається розширення вимог до програмного забезпечення в процесі спілкування із замовником програмного забезпечення. В результаті обговорення із замовником отриманих результатів досліджень алгоритмів та методів обробки даних уточнюються вимоги до програмного забезпечення, здійснюється корегування техніко-економічних показників інформаційної системи.

Організацію наукових досліджень при розробці програмного забезпечення умовно можна зобразити у вигляді структурної схеми взаємодії між замовником та компанією, що розробляє інформаційну систему та програмне забезпечення для її роботи, яка зображена на рис. 1 [1].

Відповідно до рис. 3 внесення змін до програмного забезпечення інформаційної системи, яку розробляє компанія розробник, здійснюється програмістами. Узгодження між усіма групами, які задіяні у проекті, здійснює група узгодження складових проекту. Група узгодження складових проекту безпосередньо оцінює складність функцій програмного забезпечення, обговорюючи їх із програмістами. Також група узгодження складових проекту отримує від менеджера проекту специфікації особливостей системи, а також приймає участь у розробці та прийнятті рішень разом із групою проектувальників інформаційної системи.

Взаємозв'язок із замовником інформаційної системи здійснює відділ маркетингу. Відділ маркетингу отримує від замовника інформаційної системи вимоги, які замовник висуває до інформаційної системи. Далі відбувається розгляд проекту відділом маркетингу та групою керування змінами до проекту. В результаті аналізу вимог, які замовник висуває до інформаційної системи, частина з цих вимог приймаються, а частина відхиляється при погодженні із замовником.



Рис. 1. Загальна структурна схема взаємодії між замовником та компанією, що розробляє інформаційну систему та програмне забезпечення для її роботи [1]

Прийняті вимоги передаються групою керування змінами до проекту до групи узгодження складових проекту, яка безпосередньо об'єднує усі задіяні у проекті групи. Важливим етапом розробки інформаційної системи є процес її тестування групою тестувальників, з якими група узгодження складових проекту розробляє та погоджує сценарії тестів інформаційної системи.

Етап тестування встановлює відповідність отриманих техніко-економічних показників системи із вимогами, які замовник висуває до інформаційної системи. У випадку невідповідності отриманих техніко-економічних показників системи із вимогами замовника у систему вносяться зміни, а далі процес розробки повторює до того часу, поки не будуть досягнуті вимоги замовника. У випадку неможливості забезпечення усіх вимог замовника, відділ маркетингу проводить коригування вимог із замовником, відхиляючи ті вимоги, які технічно досягнути неможливо.

В процесі розробки інформаційної системи виконуються прикладні наукові дослідження нових алгоритмів та методів обробки даних, які використовуються в роботі інформаційної системи. В процесі наукових досліджень використовуються чотири методи досліджень.

1. Метод спостереження.

Це найпростіший метод дослідження, який полягає у спостереженні за роботою інформаційної системи. В процесі спостереження за роботою інформаційної системи можна зробити висновок про достовірність нових алгоритмів та методів обробки даних, які були використані в процесі розробки інформаційної системи. Якщо отримані результати обробки даних не відповідають вимогам, які висувалися до системи, то необхідно здійснити корегування алгоритмів та методів обробки даних.

2. Метод однофакторного експерименту.

Метод однофакторного експерименту враховує лише вплив одного зовнішнього фактору на інформаційну систему і його використовують в процесі дослідження інформаційної системи на етапі її тестування. Аналіз результатів тестування впливу одного зовнішнього фактору на інформаційну систему дає можливість встановити стійкість інформаційної системи до вибраного зовнішнього фактору. Якщо стійкість інформаційної системи недостатня, то вносяться зміни до розроблених алгоритмів та методів обробки даних з метою досягнення заданих техніко-економічних характеристик інформаційної системи.

3. Метод дослідження технічних дій.

У методі дослідження технічних дій науковець експериментує з окремими випадками, так само як і в методі однофакторного експерименту. Але на відміну від методу однофакторного експерименту, метод дослідження технічних дій використовується під час перевірки нової інформаційної системи замовником в реальних умовах. Головною метою методу дослідження технічних дій є допомога замовнику при роботі із інформаційною системою в процесі дії одного зовнішнього фактору та визначення проблемних ситуацій при роботі з інформаційною системою в реальних умовах.

4. Метод багатфакторного експерименту.

Метод багатфакторного експерименту враховує вплив одночасно різних зовнішніх факторів на інформаційну систему і його використовують в процесі дослідження інформаційної системи в реальних умовах експлуатації. Особливістю методу багатфакторного експерименту є дослідження впливу сукупності різних зовнішніх факторів на інформаційну систему в при їх різних комбінаціях. Метод багатфакторного експерименту є найбільш важливим і використовується в процесі завершальних тестових випробовуваннях інформаційної системи. При використанні методу багатфакторного експерименту розробляються різноманітні сценарії тестів для врахування одночасного впливу різних зовнішніх факторів при різних їх комбінаціях та різних рівнях їх інтенсивності.

Аналіз результатів експериментальних даних при використанні методу багатфакторного експерименту дозволяє отримати статистичні дані при різних сценаріях тестування, визначити допустимі межі впливу різних зовнішніх факторів на інформаційну систему та їх різних сукупностей. Обробка отриманих статистичних даних дозволяє визначити межі допусків впливу зовнішніх факторів, а також розробити комплекс рекомендацій по експлуатації та технічному обслуговуванню інформаційної системи. Аналіз результатів експериментальних даних при використанні методу багатфакторного експерименту дозволяє також здійснювати технічне діагностування інформаційної системи та прогнозувати її роботи в реальних умовах експлуатації.

Висновки. В роботі розглянуто особливості інформаційних технологій з точки зору методології та організації наукових досліджень в процесі розробки інформаційних систем. Встановлено, що нові розробки та дослідження у галузі інформаційних технологій розпочинаються із розробки науково-дослідного проекту інформаційної системи.

Визначено, що в процесі виконання науково-дослідного проекту здійснюється циклічне виконання трьох головних етапів проектування та дослідження інформаційних систем: проведення процесу наукового дослідження; обробка отриманих результатів та перевірка достовірності отриманих результатів наукових досліджень.

Проаналізовано організацію наукових досліджень в процесі розробки програмного забезпечення. Встановлено, що організацію наукових досліджень при розробці програмного забезпечення умовно можна розділити на три головні етапи: експертна оцінка; етап керування проектом та етап керування змінами до проекту.

Зазначено, що в процесі розробки інформаційної системи виконуються прикладні наукові дослідження нових алгоритмів та методів обробки даних. Встановлено, що в процесі проведення прикладних наукових досліджень використовуються чотири головних методи: метод спостереження; метод однофакторного експерименту; метод дослідження технічних дій та метод багатфакторного експерименту.

На основі проведеного аналізу методів проведення наукових досліджень визначено, що метод багатфакторного експерименту найбільш ґрунтовно дозволяє дослідити вплив одночасно різних зовнішніх факторів на інформаційну систему. Цей метод є комплексним і дозволяє отримати статистичні дані при різних сценаріях тестування, визначити допустимі межі впливу різних зовнішніх факторів на інформаційну систему та їх різних сукупностей, а також розробити комплекс рекомендацій по експлуатації та технічному обслуговуванню інформаційної системи.

References

1. R.J. Wieringa, Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering, Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
2. A.R. Hevner, S.T. March, J. Park, S. Ram, Design science in information system research. MIS, vol. 28(1), pp. 75–105, 2004.
3. Z. Racheva, M. Daneva, A. Herrmann, K. Sikkil, R.J. Wieringa, Do we know enough about requirements prioritization in agile projects: insights from a case study, in 18th International IEEE Requirements Engineering Conference, Sydney, IEEE Computer Society, Los Alamitos, October, pp. 147–156, 2010.
4. K. Peffers, T. Tuunanen, M.A. Rothenberger, S. Chatterjee, A design science research methodology for information systems research. J. Manag. Inf. Syst. Vol. 24(3), pp. 45–77, 2008.
5. J. Schalken, Empirical investigations of software process improvement. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 2007.
6. D.I.K. Sjøberg, B. Anda1, E. Arisholm1, T. Dybå, M. Jørgensen1, A. Karahasanovicacutel, M. Vokáccaron, Challenges and recommendations when increasing the realism of controlled software engineering experiments, in Empirical Methods and Studies in Software Engineering, ed. by R. Conradi, A.I. Wang, LNCS, vol. 2765, Springer, New York, pp. 24–38, 2003.
7. R.L. Glass, V. Ramesh, I. Vessey, An analysis of research in the computing disciplines. Commun. Vol. 47(6), pp. 89–94, 2004.
8. R.L. Glass, I. Vessey, V. Ramesh, Research in software engineering: an empirical study. Technical Report TR105-1, Information Systems Department, Indiana University, September, 2001.
9. R. Wieringa, Empirical research methods for technology validation: Scaling up to practice. J. Syst. Softw. 2013.

УДК 004.31

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-12

ІВАНОВ О. В., ЛИЧАК Д. О., НІЧЕПОРУК А. О.
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСИВНОГО СИГМА-ДЕЛЬТА-МОДУЛЯТОРА ДРУГОГО ПОРЯДКУ

В роботі представлено архітектуру пасивного дельта-сигма модулятора з комутованим конденсатором, яка базується на техніці обертання із розподілом заряду, та яка дозволяє усунути міжступеневі ефекти навантаження, які є негативним чинником для традиційних пасивних модуляторів. Для поліпшення придушення шуму та стабільності роботи запропонованого модулятора до інтегратора 2-го ступеня додано незалежний додатковий шлях зворотного зв'язку та нульовий каскад.

Ключові слова: Модулятор, Сигма-дельта модуляція, Компаратор, Фільтр.

O. IVANOV, D. LYCHAK, A. NICHEPORUK
Khmelnytskyi National University

INVESTIGATION OF SECOND-ORDER PASSIVE SIGMA-DELTA MODULATOR

The ever-increasing demands on the Internet of Things and portable devices are contributing to the development of the latest trends based on energy-efficient system design. This is further motivated by the relatively slow development of energy storage technologies and consumer expectations for their operation over time. To achieve low-cost large-scale integration, along with the use of acceptable digital energy efficiency, the Internet of Things and portable devices are usually integrated into deep nanoscale CMOS technology. However, it is quite difficult to implement high-performance operational amplifiers and comparators, which are necessary elements for most analog-to-digital converters (ADCs), in deep nanoscale CMOS, given the low natural gain of transistors and low supply voltage. Therefore, passive ADC topologies are an alternative to deep nanoscale CMOS to increase the overall energy efficiency of portable devices and the Internet of Things.

The paper presents the architecture of a second-order passive modulator which uses the technique of the charge-sharing rotation to suppress the effect of interstage loading in the circuit filter of a capacitor with switched condensation. An independent additional feedback path and an additional zero-input stage are added to the 2-nd stage of the low-pass filter and optimized by behavioral simulation to increase noise attenuation in the quantization range and improve stability.

Keywords: Modulator, Sigma-delta modulation, Comparator, Filter.

Вступ. Постійно зростаючі вимоги до мереж Інтернету речей (IoT) та портативних пристроїв сприяють розвитку новітніх тенденцій, що засновані на енергоефективному проектуванні систем. Це додатково мотивовано відносно повільним розвитком технологій накопичення енергії та сподіваннями споживачів на їх експлуатацію протягом тривалого часу. Для досягнення недорогої широкомасштабної інтеграції, разом із використанням прийнятної цифрової енергоефективності, мережі Інтернету речей та портативні пристрої зазвичай інтегруються в глибоку наномасштабну технологію КМОН (deep nanoscale CMOS technology). Однак, досить складно впровадити високопродуктивні операційні підсилювачі та компаратори, які є необхідними елементами для більшості аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), в глибокі наномасштабні КМОН, враховуючи низький власний коефіцієнт підсилення транзисторів та занижену напругу живлення. Тому пасивні топології АЦП є альтернативою глибоких наномасштабних КМОН для підвищення загальної енергоефективності портативних пристроїв та мереж Інтернету речей.

Сигма-дельта модуляція. Для точної обробки електричних сигналів використовуються цифрові методи, однак вимірювані фізичні величини, будь-які процеси у природі, людська мова являються аналоговими. Тому відповідні їм електричні сигнали, що отримуються в результаті зчитування (вимірювання), повинні пройти етап перетворення до цифрового виду. Перетворення здійснюється за допомогою аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП), серед яких сигма-дельта АЦП, що володіють підвищеною точністю [3].

На рис. 1 наведено узагальнену структурну схему сигма-дельта модулятора. Розглянемо детальніше принцип її роботи.

Аналоговий вхідний сигнал (1) надходить на вираховувач, де з нього віднімається вихідний сигнал однобітного ЦАП зворотного зв'язку (що формує напругу $+V_{ref}$ або $-V_{ref}$), після чого отриманий сигнал (2) надходить в інтегратор. Інтегратор накопичує різницю між аналоговим вхідним сигналом (1) і вихідним сигналом однобітного ЦАП зворотного зв'язку ($+V_{ref}$ або $-V_{ref}$). Сигнал з виходу інтегратора (3) надходить на компаратор, який порівнює цей сигнал з нульовою опорною напругою. Вихідний стан компаратора (4) по такому сигналу фіксується D-тригером (5) для передачі на вихід модулятора через дискретні часові інтервали. Вихід D-тригера являє собою цифровий однобітний вихід сигма-дельта-модулятора. Цей вихідний сигнал також надходить на однобітний ЦАП зворотного зв'язку, який може формувати тільки дві напруги (як правило, в якості ЦАП використовується аналоговий комутатор, що перемикає вихід між

джерелами опорних напруг $+V_{ref}$ і $-V_{ref}$). Швидкість передачі вихідного потоку одиниць даних визначається тактовою частотою модулятора.

Результат роботи сигма-дельта-модулятора є потік цифрових даних, який синхронізується тактовим сигналом модулятора. Середнє значення цих даних (обчислене в цифровій області) відповідає вхідному аналоговому напрузі. Це середнє значення обчислюється як відношення числа одиничних бітів до числа нульових бітів у вихідному потоці сигма-дельта-модулятора протягом заданої кількості періодів тактового сигналу.

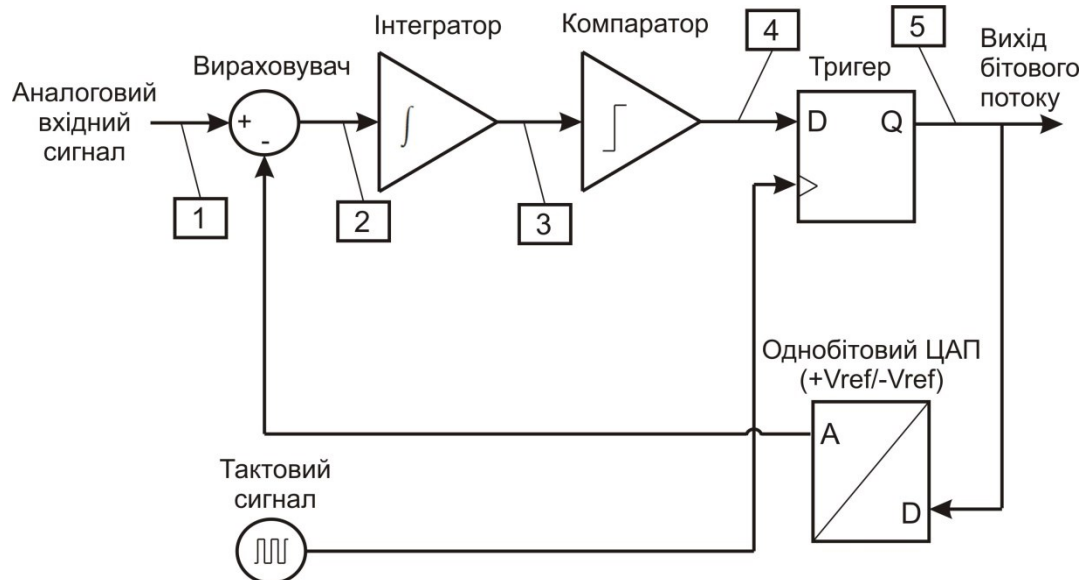


Рис. 1. Узагальнену структурну схему сигма-дельта-модулятора

У наномасштабному КМОН через труднощі з реалізацією операційних підсилювачів та відносно високе енергоспоживання багатоступеневих підсилювачів були введені різні методи для зменшення кількості та енергоспоживання операційних підсилювачів в сигма-дельта АЦП. Зокрема, вони включають наступні техніки:

- комутованих операційних підсилювачів;
- спільного використання підсилювачів;
- заміни операційних підсилювачів;
- інтегратори на основі регулятора напруги (VCO) та пасивні інтегратори.

Комутована техніка операційного підсилювача. Операційні підсилювачі всередині інтеграторів працюють лише під час відповідної фази інтеграції, в той час як вони просто споживають статичну потужність. Натомість операційні підсилювачі можуть бути відключені під час інших фаз, для того щоб зменшити споживання енергії.

Це можна зробити, зарядивши конденсатор для відбору проб на наступному етапі та інтегрувавши його протягом тієї ж фази [4–7]. Однак час спрацювання комутованих операційних підсилювачів зменшує доступний час встановлення сигналу, а отже, збільшує вимогу до смуги пропускання [4].

Техніка спільного використання операційних підсилювачів. Техніка спільного використання операційних підсилювачів може ділити операційні підсилювачі між складовими інтеграторами та суматорами під час різних фаз усередині сигма-дельта-модулятора. Тому його можна використовувати для підвищення енергоефективності системи [4, 8, 9]. Однак окремий підсилювач у роботі надмірно обмежений специфікаціями шуму та врегулювання інтегратора 1-го ступеня, які є досить непотрібними для наступних двох етапів [9].

Для належного розподілу операційних підсилювачів між різними каскадами також слід використовувати складну логіку управління синхронізацією. Крім того, через вузол заземлення спільних операційних підсилювачів система страждає від ефекту пам'яті спільних операційних підсилювачів, що погіршує загальну продуктивність всієї системи.

Техніка заміни операційного підсилювача. Техніка заміни операційного підсилювача намагається замінити операційні підсилювачі альтернативними блоками, такими як детектори нульового перетину [10], динамічні компаратори [11], інвертори [12] та кільцеві підсилювачі. Сигма-дельта-модулятори з детекторами нульового перетину, можуть навряд чи досягти високої роздільної здатності через перевищення напруги, що спричинене затримками переходу від нуля до стабільного результату виявлення. В той час як точність сигма-дельта модуляторів, що використовують інтегратори на основі динамічних компараторів та

інверторів, в основному погіршується через їх обмежений коефіцієнт посилення постійного струму та зміщення, яке передається на вхід.

Для кільцевих підсилювачів, основним недоліком їх використання є погана стабільність. Більше того, через їх нелінійну природу та кілька діючих областей, досить складно розробити стабільний кільцевий підсилювач.

Інтегратори на основі регулятора напруги (VCO) та пасивні інтегратори. Альтернативний метод полягає у використанні інтегратора на основі регулятора напруги для заміни звичайних інтеграторів, що потребують високопродуктивних операційних підсилювачів [13, 14]. Однак, при надходженні великих сигналів, лінійність генератора погіршується, що вимагає калібрування та, в загальному, обмежує точність АЦП. Тому з метою усунення міжступеневих ефектів, які є негативним чинником для більшості традиційних пасивних модуляторів запропоновано структуру пасивного сигма-дельта модулятор другого порядку, що базується на техніці обертання із розподілом заряду.

Структура та принцип роботи пасивного сигма-дельта-модулятор другого порядку. Спрощена схема запропонованого модулятора $\Delta\Sigma$ другого порядку на основі обертання із розподілом заряду представлена на рис. 1. Запропонований модулятор містить фільтр низької частоти другого порядку (IIR2), 1-бітний ЦАП із зворотнім зв'язком та компаратор.

Принцип роботи IIR2 фільтра заснований на дослідженні представленому у роботі [1, 2]. Це повністю пасивна топологія, яка уникає використання експлуатаційних або будь-яких активних підсилювачів і використовує лише конденсатори та перемикачі із КМОН структурою, що в свою чергу дозволяє запобігти будь-яким міжетапним ефектам навантаження. Протягом Φ_1 , V_{IN} відбирається на конденсаторі C_S , а потім на протязі Φ_2 верхня пластина C_S з'єднується з верхньою пластиною C_{H1} , викликаючи розподіл заряду між C_S і C_{H1} . Тому в кінці Φ_2 C_S і C_{H1} зберігають однакову інформацію про напругу. Отже, замість того, щоб використовувати C_{H1} для зарядки C_{S2} , а потім приймати C_{S2} для зарядки C_{H2} , IIR2 використовує C_S для безпосередньої зарядки C_{H2} . Коли заявляється Φ_3 , C_S підключається до верхньої пластини C_{H2} , за допомогою якої інформація про напругу, що зберігається в C_S , ідентична інформації про напругу, що зберігається в C_{H1} в кінці Φ_2 , переходить до C_{H2} без втрат заряду в C_{H1} . На відміну від каскадно-пасивних інтеграторів SC, каскадно-пасивні інтегратори в IIR2 використовують один конденсатор дискретизації C_S між каскадами. З цієї причини IIR2 не проявляє будь-яких міжетапних ефектів навантаження, незважаючи на те, що використовуються два каскадні пасивні інтегратори.

На представленому рівні модулятора, протягом Φ_1 , різниця напруг між вхідним сигналом V_{IN} та виходом 1-бітового ЦАП зворотного зв'язку, що керованим 1-бітовим виходом квантування, $\bar{Y}$ та Y відбирається на конденсаторі C_S .

Враховуючи, що коливання сигналу напруги на вході попереднього підсилювача є досить малим (від десятків до кількох сотень мкВ), заряд пам'яті всередині C_S наприкінці Φ_3_1 є досить малим, щоб не впливати на осідання нового зразка. Протягом Φ_2 інформація про заряд, що зберігається на C_S і C_{H1} , передається та оновлюється, що реалізує дію пасивного інтегратора 1-го ступеня. Φ_3_1 та Φ_3_2 – це дві фази Φ_3 , що не перекриваються. Протягом Φ_1 верхні пластини C_S , C_{H2} і конденсатор зворотного зв'язку C_{FB} з'єднані між собою, щоб розділити свої заряди. Це, у свою чергу, представляє дію інтегратора 2-го ступеня з додатковим незалежним зворотним шляхом. Компаратор порівнює коливання напруги на вході попереднього підсилювача і генерує вихід системи $Y/\bar{Y}$ на нижньому краю Φ_3_1 . Протягом Φ_3_2 верхні пластини C_{H2} і C_{H2_Z} з'єднуються між собою. Це додає нуль до передавальної функції інтегратора 2-го ступеня, що сприяє стабільності. Для того, щоб мінімізувати вхідний шум і максимізувати коефіцієнт підсилення компаратора, перед звичайним компактним динамічним фіксатором використовується каскад попереднього підсилювача. Враховуючи паразитний конденсатор C_P на вузлі з'єднання між конденсатором вибірки C_S та стримуючими конденсаторами, передавальна функція інтегратора 1-го ступеня $H_1(z)$ та 2 ступеня $H_2(z)$ може бути виражена наступними виразами:

$$H_1(z) = \frac{\frac{1}{\gamma + p + 1} \cdot z^{-1}}{1 - \frac{r}{r + p + 1} \cdot z^{-1}} \quad (1)$$

$$H_2(z) = \frac{[1 - (1 - \varsigma)z^{-1}] \cdot \frac{\rho}{\gamma + p + 1 + \beta} z^{-1}}{1 - \left(1 - \varsigma \frac{1 + p + \beta}{\gamma + \rho + 1 + \beta}\right) z^{-1}} \quad (2)$$

де $\gamma = C_{H2}/C_S$, $\beta = C_{FB}/C_S$, $\rho = C_P/C_S$, а $\varsigma = C_{H2} / (C_{H2} + C_{H2_Z})$, що впливає на положення нуля для передавальної функції.

Вираз $\zeta \frac{1+p+\beta}{\gamma+p+1+\beta}$ в знаменнику можна розглядати як показник того, наскільки віддалений полюс від одиничного кола ($z=1$). Розташування полюса, таким чином, визначається γ , β , ρ та ζ . Зменшуючи ζ , полюс можна перемістити ближче до одиничного кола.

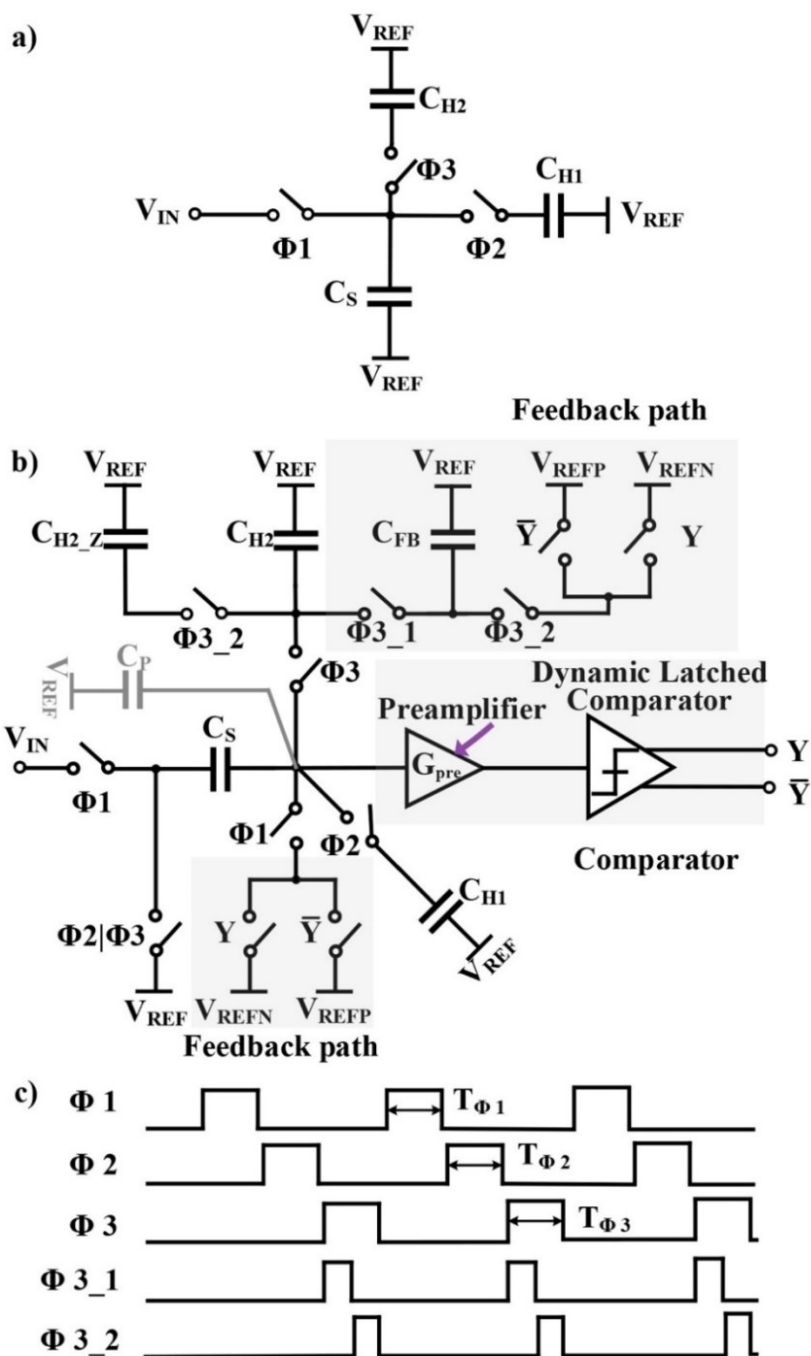


Рис. 1. Фільтр PIR2 на основі обертання з розподілом заряду (а), запропонований пасивний модулятор другого порядку (b) та його тимчасова діаграма (c)

Висновки. В роботі представлено архітектуру пасивного модулятора другого порядку, що використовує техніку обертання з розподілом заряду для придушення ефекту міжступеневого навантаження у фільтрі контуру конденсатора з комутованою конденсацією. Незалежний додатковий шлях зворотного зв'язку та додатковий етап, що вводять нуль у функцію передачі, додаються до 2-го ступеня низько-частотного фільтру та оптимізовані за допомогою моделювання поведінкового моделювання, щоб збільшити послаблення шумів в діапазоні квантування і поліпшити стабільність роботи.

References

1. M. Tohidian, I. Madadi and R. B. Staszewski, "Analysis and design of a high-order discrete-time passive IIR low-pass filter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 11, pp. 2575–2587, Nov. 2014.
2. H. Wang, F. Schembari and R. B. Staszewski, "Passive SC $\Delta\Sigma$ Modulator Based on Pipelined Charge-Sharing Rotation in 28-nm CMOS," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 2, pp. 578–589, 2020, doi: 10.1109/TCSI.2019.2944467.
3. В. С. Голуб "Сигма-дельта-модуляторы и АЦП", *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, №4, с. 35–41, 2003.
4. I. Chao et al., "Analysis of Splittable Amplifier Technique and Cancellation of Memory Effect for Opamp Sharing," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 621–634, 2017.
5. H. C. Kim, D. K. Jeong, and W. Kim, "A partially switched-opamp technique for high-speed low-power pipelined analog-to-digital converters," *IEEE Trans. Circ. Syst. I*, vol. 53, no. 4, pp. 501–801, Apr. 2006.
6. V. Peluso et al., "A 900-mV low-power $\Delta\Sigma$ A/D converter with 77-dB dynamic range," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 12, pp. 1887–1897, 1998.
7. V. Peluso, M. S. J. Steyaert, and W. Sansen, "A 1.5-V-100- μ W $\Delta\Sigma$ Modulator with 12-b dynamic range using the switched-opamp technique," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 7, pp. 943–952, 1997.
8. A. Pena-Perez, E. Bonizzoni, and F. Maloberti, "A 88-dB DR, 84-dB SNDR very lowpower single op-amp third-order $\Sigma\Delta$ modulator," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 9, pp. 2107–2218, Sep. 2012.
9. M. Sadollahi, G. C. Temes, "A 10-MHz BW 77.9 dB SNDR DT MASH $\Delta\Sigma$ ADC With NC-VCO-Based Quantizer and OPAMP Sharing," *IEEE Trans. Circ. Syst. I*, vol. 66, no. 9, pp. 3384–3392, 2019.
10. J. Park, Y. Hwang, and D. Jeong, "A 0.4-to-1 V Voltage Scalable $\Delta\Sigma$ ADC With Two-Step Hybrid Integrator for IoT Sensor Applications in 65-nm LP CMOS," *IEEE Trans. Circ. Syst. II*, vol. 64, no. 12, pp. 1417–1421, 2017.
11. M. C. Huang and S. I. Liu, "A Fully Differential comparator-Based Switched-Capacitor $\Delta\Sigma$ Modulator," *IEEE Trans. Circ. Syst. II*, vol. 56, no. 5, pp. 69–73, 2005.
12. T. Christen, "A 15-bit 140- μ W Scalable-Bandwidth Inverter-ased $\Delta\Sigma$ Modulator for a MEMS Microphone With Digital Output," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 7, pp. 1605–1614, July. 2013. Bibliography 103
13. A. Babaie-Fishani and P. Rombouts, "A mostly digital VCO-based CT-SDM with third-order noise shaping," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 8, pp. 2141–2153, 2017.
14. F. Cardes et al., "0.04-mm² 103-dB-A Dynamic Range Second-Order VCO-Based Audio $\Sigma\Delta$ ADC in 0.13- μ m CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 6, pp. 1731–1742, 2019.

УДК 535.39

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-13

КАШУБА А. І., СЕМКІВ І. В.,
ПЕТРУСЬ Р. Ю., КАШУБА Н. Ю., УКРАЇНЕЦЬ Н. А.
Національний університет «Львівська політехніка»

ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ АЛЮМІНІЄМ НА КІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ОКСИДУ ЦИНКУ

Представлені результати досліджень дисперсії параметрів та оптичних функцій для тонкої плівки оксиду цинку легованого алюмінієм. Осадження тонких плівок ZnO, легованих Al (2,5 мас. %), виконувалось методом високочастотного магнетронним напылення. Тонка плівка ZnO:Al кристалізується в гексагональній структурі (тип структури - ZnO, просторова група $P6_3mc$ (No. 186), з параметрами елементарної комірки $a = 3.226(2) \text{ \AA}$ і $c = 5.155(6) \text{ \AA}$ ($V = 46.49(6) \text{ \AA}^3$). Спектри оптичного пропускання (300–2500 нм) показали, що тонка плівка ZnO:Al має високу оптичну якість, а значення величини оптичної ширини забороненої зони (3,26 eV) є дуже близьким до нелегованих зразків. Встановлено спектральну поведінку оптичних функцій: показника заломлення, коефіцієнта екстинкції, показника поглинання, діелектричних функцій та оптичної провідності. Встановлено значення енергії Урбаха та залежність сили осцилятора від ширини оптичної забороненої зони та концентрація легуючого елемента. Спостерігається збільшення енергії Урбаха для легованої Al тонкої плівки ZnO порівняно з нелегованою. Для досліджуваної тонкої плівки виявлено майже подвійне збільшення значення сили оптичного осцилятора в порівнянні із нелегованими зразками. Вплив легування алюмінієм тонких плівок ZnO на динаміку зміни оптичної рухливості, оптичного опору та часу релаксації встановлено вперше для досліджуваної сполуки. Також, визначається значення плазмової частоти та її кореляція з концентрацією носіїв. Легування тонких плівок ZnO алюмінієм призводить до збільшення оптичної рухливості, часу релаксації та плазмової частоти, що було виявлено порівнянням з відомими даними для нелегованих тонких плівок ZnO. Виявлені оптичні властивості досліджуваної тонкої плівки вказують на перспективи її практичного використання як матеріалу для оптоелектронних пристроїв.

Ключові слова: тонкі плівки, поглинання, дисперсія, показник заломлення, пропускання, оптичні функції, час релаксації.

A. KASHUBA, I. SEMKIV,
R. PETRUS, N. KASHUBA, N. UKRAINETZ
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

INFLUENCE OF THE ALUMINUM DOPING ON THE KINETIC PROPERTIES OF ZINC OXIDE THIN FILMS

The results of the dispersion of optical functions and optical constants studies for zinc oxide thin film doped with aluminum are presented. The deposition of Al-doped ZnO (2.5 wt. %) thin films are performed by magnetron sputtering. Al-doped ZnO thin film crystallizes in hexagonal structure (structure type - ZnO, space group $P6_3mc$ (No. 186), with the unit-cell dimensions $a = 3.226(2) \text{ \AA}$ and $c = 5.155(6) \text{ \AA}$ ($V = 46.49(6) \text{ \AA}^3$). Optical transmittance spectra (300–2500 nm) showed that the Al-doped ZnO thin film is of high optical quality and value of optical bandgap (3.26 eV) is very close to undoped samples. The study of optical functions is performed on the basis of the experimentally measured transmission spectrum using the bypass method. The spectral behavior of optical functions: refractive index, extinction coefficient, absorption index, dielectric functions and optical conductivity are established. The value of Urbach's energy and the dependence of oscillator strength on the size of the bandgap and the concentration of doping element are determined. Observed is the increase of the Urbach's energy for Al-doped ZnO thin film in comparison to the undoped ones. The almost double increase of the optical oscillator strength value has been revealed for the thin film studied. The influence of aluminum doping on the dynamic change of optical mobility, optical resistance and relaxation time is established for the first time for studied compound. Also, the value of the plasma frequency is determined and its correlation with the carrier density is defined. The doping of ZnO thin films with aluminum leads to the increase of the optical mobility, relaxation time and plasma frequency that was revealed by comparison with reference data for the undoped ZnO. Due to good optical properties, this thin film is good candidates as materials for optoelectronic devices.

Keywords: thin films, absorption, dispersion, refractive index, transmission, optical function, relaxation time.

Постановка задачі. Оксид цинку (ZnO) широко використовується у багатьох оптоелектронних пристроях, таких як варистори, біосенсори, газові датчики, прозорі електроди тощо [1]–[8]. ZnO є перспективним матеріалом завдяки широкій забороненій щільності прямо зонного типу (3,37 eV для монокристалу) при кімнатній температурі та високій енергії зв'язування екситону (60 meV), що дозволяє використовувати його в ультрафіолетовій області [9, 10]. При відносно низькій температурі осадження [11, 12] плівки ZnO можна проводити за допомогою різноманітних методів, таких як високочастотне (ВЧ) магнетронне осадження, розпилювальний піроліз, спінове покриття, осадження парів органічними хімічними засобами та імпульсне лазерне нанесення [5–7, 11–23]. ZnO зазвичай легують елементами III групи, такими як B, Ga, In або Al, щоб поліпшити та розвинути оптичну проникність та пропускну здатність оптичної енергії тонких плівок ZnO шляхом зміни його електричних, оптичних та інших властивостей. Концентрація легування Al відіграла важливу роль у збільшенні прозорості та зсуві оптичного зазору тонких плівок ZnO.

Легування тонкими плівками оксиду цинку призводить до різних змін фізичних властивостей. У більшості випадків легування тонких плівок призводить до збільшення величини оптичної ширини забороненої зони [13–15, 17–24], спричиненого впливом ефекту Бурштейна–Мосса [22–24] та збільшенням дефектів [23] (Zn, O вакансії). У ряді досліджень [25–28] легування різними хімічними елементами призводить до зменшення ширини зазору або величина зазору залишається майже незалежною від легування.

Як наслідок, фізичні властивості тонких плівок оксиду цинку можуть залежати від методу осадження, або легуючого хімічного елемента. Оскільки одним із переважних застосувань тонких плівок оксиду цинку є сонячна енергія (ZnO як провідний матеріал) та газові датчики, важливо знати поведінку оптичних функцій та оптичних констант (включаючи оптичну рухливість, час релаксації та оптичний опір).

В даному дослідженні було обрано зразок оксиду цинку легованого алюмінієм (2,5 мас.%). В даний час відсутні довідкові дані про основні оптичні параметри (оптична рухливість, час релаксації, оптичний опір) тонких плівок ZnO:Al, отриманих методом ВЧ магнетронного осадження.

Попередні роботи. Останні дослідження тонкої плівки ZnO, легованої 1 мас. % атомів Ga або Al та отримані методом магнетронного розпилення, виявили суттєву різницю між їх електричними та оптимальними властивостями [24]. Спостерігається, подібного до металів, температурна поведінка опору і збільшення оптичної ширини забороненої зони до 3,63 eV порівняно з чистою плівкою ZnO (3,21 eV). Ці параметри вказують на те, що атоми Ga є замісними домішками в плівці ZnO. У той же час плівка ZnO:Al поводить як напівпровідник і демонструє незначне збільшення оптичної ширини забороненої зони (3,25 eV) порівняно з чистою плівкою ZnO. Очікується, що домішки Al та Ga поведуться як домішки заміщення в матриці ZnO, оскільки вони мають подібну електронну структуру рівнів валентності. Автори пояснюють таку різну поведінку легованих плівок тенденцією катіонів Al і Ga займати різні позиції в матриці ZnO. Натомість результати розрахунків *ab initio* та експериментальних досліджень [25] показали, що незначне збільшення зазору в оксиді цинку, легованому Al, може бути спричинене вакансіями Zn.

У роботі [26] представлені результати дослідження впливу морфології поверхні на оптико-спектральні та електричні властивості тонких плівок ZnO з різними концентраціями легування індієм, алюмінієм та галієм, нанесеними на скляні підкладки. Для ZnO:Al плівки з концентрацією домішок від 0,3 до 1,4 мас.% значення смуги пропускання збільшується з 3,49 до 3,46 eV відповідно. Автори вважають, що збільшення величини оптичного зазору до допінгу атомами Al викликане ефектом Бурштейна–Мосса.

Враховуючи зазначену аргументацію, спостерігається незначна розбіжність в поведінці та інтерпретації експериментальних та/або теоретичних результатів оптичних досліджень ZnO:Al.

Метою даної роботи є дослідження структурних та оптичних властивостей легованих Al тонких плівок ZnO (ZnO:Al), приготованих на скляних підкладках методом ВЧ магнетронного осадження. Спектри пропускання у видимій та ближній інфрачервоній областях вивчаються при кімнатній температурі. На основі цих результатів розраховуються основні оптичні параметри та значення показника заломлення. Середня товщина тонкої плівки ZnO:Al розраховується за оптичними спектрами пропускання.

Основна частина. Експериментальні дослідження. Тонкі плівки ZnO:Al осаджували на скляні підкладки розміром $16 \times 8 \times 1,1$ мм³ методом ВЧ магнетронного розпилення (~13,6 МГц) за допомогою вакуумної станції ВУП-5М (Selmi, Україна) [27]–[29]. В якості мішені використовували диск із спеченого порошку ZnO (чистота – 99,99 %) з домішкою Al₂O₃ (2,5 мас.%). Відстань мішень–підкладка становила 60 мм. Початок і кінець процесу розпилення контролювалися за допомогою рухомої заслінки.

Перед процесом осадження камеру відкачували. Тиск газу всередині камери під час розпилення плівки становив 4×10^{-4} Па. Даних умов можна досягнути при використанні петролейного ефіру (5Ф4Е) як дифузійної рідини у вакуумному насосі, який має низький тиск пари 9×10^{-7} Па.

Потужність ВЧ-магнетрона підтримувалась на рівні 30 Вт, а температура підкладки ~373 К. Високотемпературний вольфрамовий нагрівач потужністю 300 Вт використовувався для нагрівання підкладок. Температуру контролювали за допомогою ПІД-регулятора, що забезпечує регулювання швидкості нагрівання, охолодження та умови осадження.

Фазовий аналіз та уточнення кристалічної структури досліджували за даними рентгенівської дифракції (XRD), отриманими на дифрактометрі DRON-2.0M при кімнатній температурі з випромінюванням $K\alpha$ -Fe ($\lambda = 1,936087$ Å).

Морфологію поверхні отриманих плівок ZnO:Al вивчали за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM 6700F (SEM-EDS). Спектральні залежності оптичного пропускання отриманих зразків вимірювали у видимій та ближній інфрачервоній областях (300–2500 нм) при кімнатній температурі за допомогою спектрометра Shimadzu UV-3600 [30].

Кристалічна структура плівок ZnO:Al була визначена на основі результатів XRD (див. рис. 1). Піки XRD були виявлені при 40,9, 44,25, 46,75 та 73,6 що відповідають індексам (100), (002), (101) та (110) ZnO, які вказують на формування гексагональної структури вюрциту. Як результат, тонка плівка ZnO:Al кристалізується в гексагональній структурі (структури тип – ZnO, просторова група $P6_3mc$ (№ 186), з параметрами елементарної комірки $a = 3,226(2)$ Å і $c = 5,155(6)$ Å ($V = 46,49(6)$ Å³). Детальний аналіз положень експериментальних рефлексів та їх інтенсивності порівняно з теоретичними піками показав дуже сильну

переважну орієнтацію зерен фази ZnO у синтезованій плівці (текстурі). Порівняно невеликі аномальні рефлекси від площини з (10z) та (20z) hkl індексами Міллера також спостерігаються.

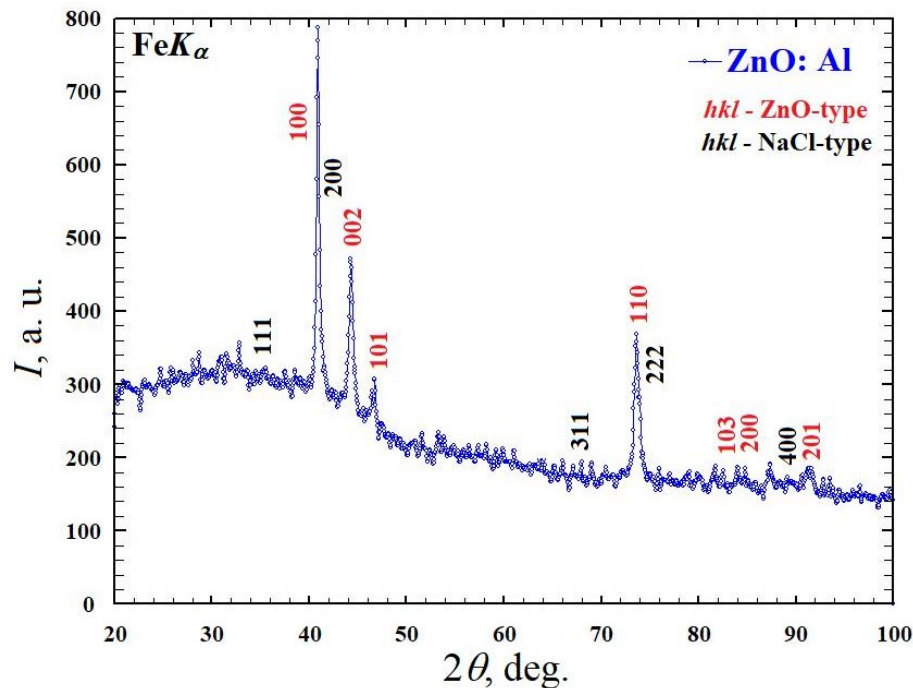


Рис. 1. XRD картина тонких плівок ZnO:Al

Жодних додаткових піків (за допомогою XRD аналізу), що належать до інших оксидів, виявити не вдалось, що свідчить про утворення чистої однофазної сполуки з структурним типом ZnO, а також про те, що Al добре інтегрований у решітку ZnO.

Розмір кристалітів (D) оцінювали на основі розширення піків за допомогою рівняння Шеррера [31]:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі рентгенівських променів, B – ширина піку на половині максимуму (FWHM), а θ – кут Брегга.

Деформація (ϵ) та щільність дислокації (δ) були розраховані з використанням наступних співвідношень [32]:

$$\delta = \frac{1}{D^2}, \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta(2\theta) \cdot \cos\theta}{4}. \quad (3)$$

Орієнтація зерен визначається з використанням коефіцієнта текстури $TC(hkl)$ [15]:

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{n \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}} \quad (4)$$

де $I(hkl)$ – виміряна відносна інтенсивність площини (hkl), $I_0(hkl)$ – стандартна інтенсивність площини (hkl), взята з даних JCPDS (карта даних JCPDS 36-1451), а n – кількість дифракційних піків. Збільшення коефіцієнта текстури ($TC(hkl) > 1$) показує переважну орієнтацію кристалітів вздовж площини (100).

Параметри, отримані в результаті дифракції рентгенівських променів, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні структурні параметри плівки ZnO:Al

Структурний тип	ZnO
Просторова група	$P6_3mc$
Параметри елементарної комірки	$a = 3.226(2) \text{ \AA}$
	$c = 5.155(6) \text{ \AA}$
	$V = 46.49(6) \text{ \AA}^3$
$D, \text{ nm}$	44.29 ± 6.87
$\delta, \text{ nm}^{-2}$	0.00051
ε	0.10 ± 0.01
$TC_{(hkl)}$	1.79
$d, \text{ nm}$	454.83

Морфологія поверхні синтезованих плівок наведена на рис. 2. Поверхню плівки промивали ацетоном перед дослідженням морфології. Слід зазначити, що утворення зерен нечасте. Було виявлено кристаліти у вигляді пластинок, які, найчастіше, мають регулярну форму.

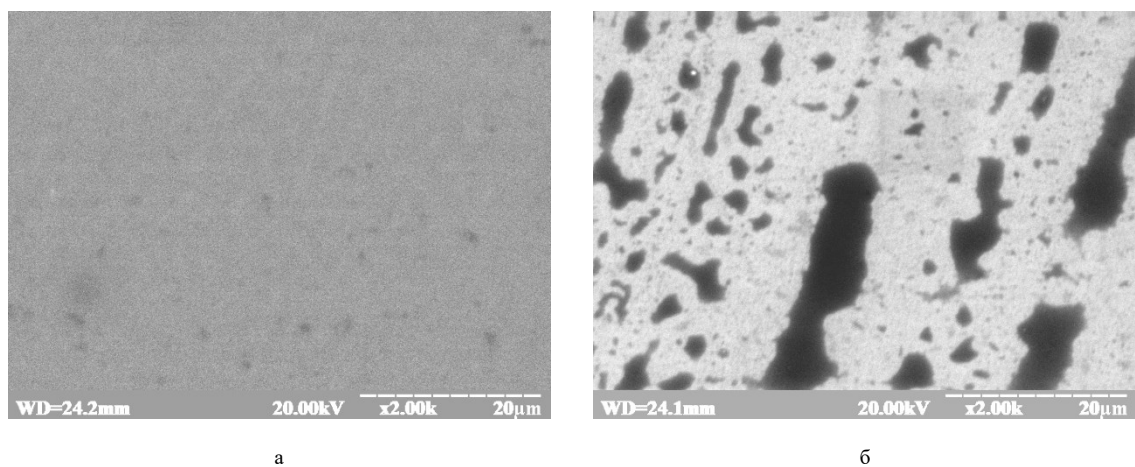


Рис. 2. Морфологія поверхні плівок ZnO:Al (а – COMPO-, б – TOPO-режим)

Енергетично-дисперсійний рентгенівський аналіз (EDX) використано в якості аналізу хімічного складу матеріалів. Аналіз EDX тонкої плівки ZnO:Al показаний на рис. 3. Спектри показують, що тонка плівка утворюється з потрібних елементів. Наявність Si і Ca у зразку можна пояснити скляною підкладкою.

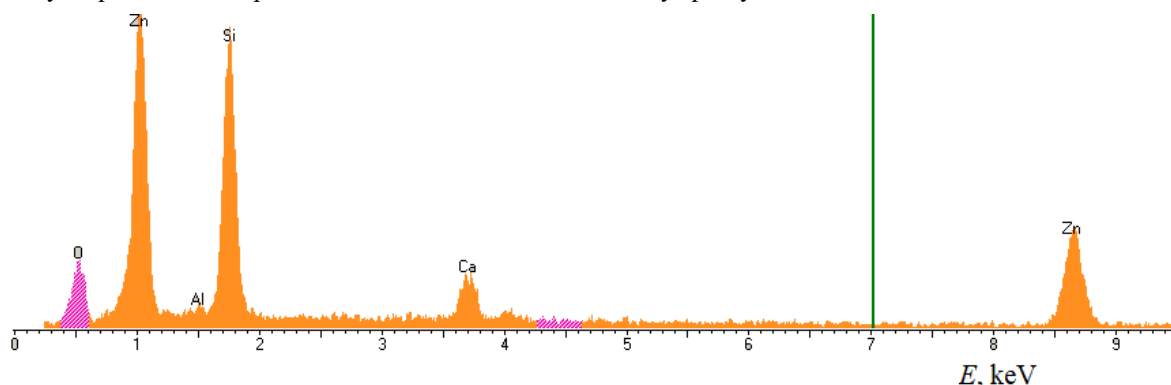


Рис. 3. Спектральна залежність характеристичного X-випромінювання та елементний склад плівки ZnO:Al

Спектри пропускання $T(\lambda)$ плівок ZnO:Al (див. рис. 4) характеризуються яскраво вираженим краєм основного поглинання. Інтегральну величину плівки ZnO:Al оцінювали наступним чином:

$$\tilde{T} = \frac{1}{b-a} \int_a^b T \cdot d\lambda \quad (5)$$

де $\tilde{T}$ – інтегральна величина пропускання в діапазоні $a-b$ (див. рис. 4). Отримане значення інтегральна величина пропускання становить 77,78 % ($a = 300 \text{ nm}$, $b = 2500 \text{ nm}$).

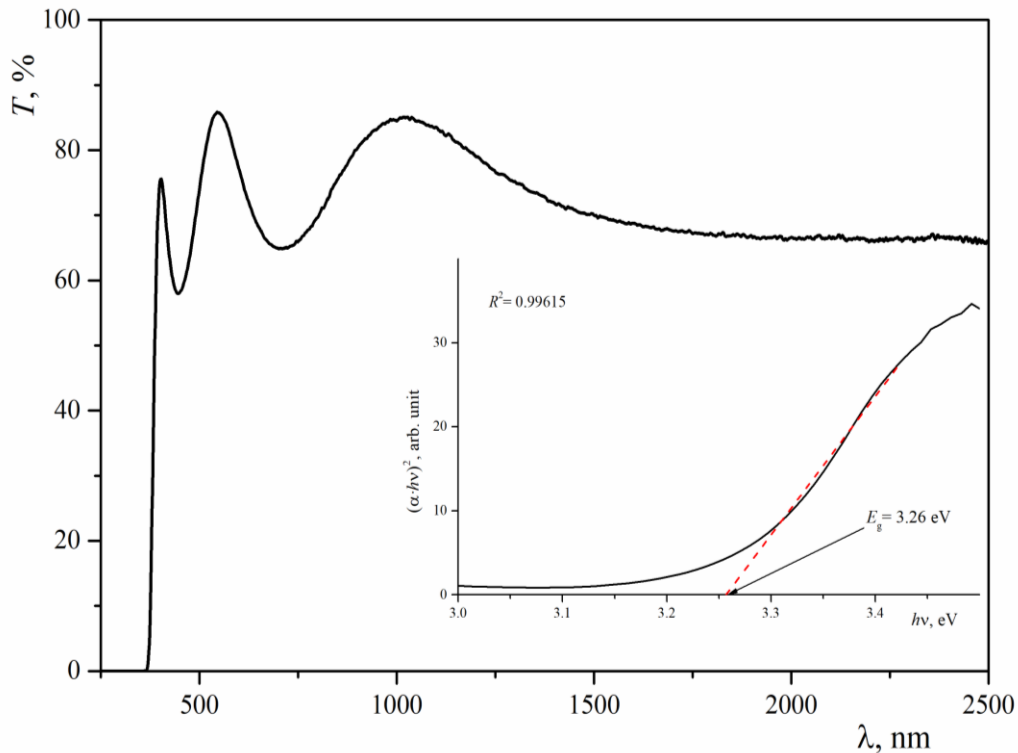


Рис. 4. Спектр оптичного пропускання тонкої плівки ZnO:Al при кімнатній температурі.
Вставка: коефіцієнт поглинання α в координатах $(\alpha \cdot hv)^2 = f(hv)$. R^2 – коефіцієнт детермінації

Спектри пропускання також характеризуються наявністю інтерференційних максимумів та мінімумів, що свідчить про досконалість отриманих плівок. Наявність спостережуваних максимумів та мінімумів дозволяє визначити товщину плівки.

Для визначення товщини досліджуваних плівок було використано рівняння:

$$d = \frac{M \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot (n(\lambda_1) \cdot \lambda_2 - n(\lambda_2) \cdot \lambda_1)} \quad (6)$$

де, λ_1 і λ_2 – довжини хвиль, що відповідають сусіднім екстремумам у спектрі пропускання, а $M=1$ для двох сусідніх екстремумів одного типу (max–max, min–min) та $M=0,5$ для двох сусідніх екстремумів протилежних типів (max–min, min–max) [28]. Товщина плівки ZnO:Al, обчислена з використанням рівняння (6) становить 454,83 нм.

Для встановлення величини оптичної ширини забороненої зони було використано координати Тауца. З графіку залежності $(\alpha \cdot hv)^2$ від hv (α – коефіцієнт поглинання, а hv – енергія фотона) можна отримати значення оптичної ширини забороненої зони E_g шляхом екстраполяції лінійної частини ділянки на вісь енергії фотона (рис. 4), а також ідентифікувати її як прямо зонний перехід. Значення оптичної ширини забороненої зони плівки ZnO:Al становить $E_g = 3,26$ eV. Дане значення (E_g) добре узгоджується із відомими літературними відомостями [7, 8, 33–35].

Порівняння отриманих результатів з відомими літературними даними [24] дозволяє встановити суттєву кореляцію отриманих результатів, а саме, в роботі [24] авторами тонкі плівки ZnO:Al були отримані методом магнетронним розпиленням (аналогічний метод був використаний у цій роботі). Значення оптичної ширини забороненої зони тонкої плівки ZnO та легованої Al плівки оцінюється як 3,21 eV та 3,25 eV, відповідно.

Як зазначалося вище та в [24]–[26], це явище пояснюється впливом ефекту Бурштейна–Мосса ($\Delta E_g = E_g(\text{ZnO:Al}) - E_g(\text{ZnO}) = 0,05$ eV).

Значення показника заломлення n тісно пов'язане з електронними властивостями та шириною забороненої зони. Багато емпіричних зв'язків між показником заломлення n та шириною забороненої зони було запропоновано раніше [36–44].

Відповідно до співвідношення Tripathy [44], показник заломлення напівпровідника з шириною забороненої зони E_g визначається як:

$$n = n_0[1 + \alpha e^{-\beta E_g}] \quad (7)$$

де $n_0 = 1,73$, $\alpha = 1,9017$ та $\beta = 0,539 \text{ (eV)}^{-1}$ є постійними параметрами для певних діапазонів температури та тиску.

Визначення показника заломлення з використанням даного співвідношення задовільно корелює з відповідними експериментальними залежностями для напівпровідників з шириною забороненої зони в діапазоні $0 < E_g < 5 \text{ eV}$. Деякі інші емпіричні співвідношення, відомі з літератури: Moss [36], Ravindra [38] та Herve–Vandamme (HV):

$$n^4 E_g = 95 \text{ eV}, \quad (8)$$

$$n = 4.084 - 0.62 E_g, \quad (9)$$

$$n^2 = 1 + \left(\frac{A}{E_g + B} \right)^2 \quad (10)$$

де A – енергія іонізації водню $13,6 \text{ eV}$, а $B = 3,47 \text{ eV}$ – постійний параметр, який вважається різницею між енергією ультрафіолетового резонансу та шириною забороненої зони.

Розраховані значення n за допомогою різних моделей подано в таблиці 2. На основі значень n , розрахованих за різними співвідношеннями, також розраховуємо високочастотну діелектричну константа ($\epsilon_\infty = n^2$).

Таблиця 2

**Показник заломлення n і високочастотна діелектрична константа ϵ_∞
для тонкої плівки ZnO:Al визначена із використанням співвідношень (7)–(10)**

Модель	Tripathy (7)	Moss (8)	Ravindra (9)	HV (10)
n	2.02	2.32	2.06	2.25
ϵ_∞	4.08	5.38	4.24	5.06

Плівка ZnO, легована Al (приблизно 2 % мас. Al), наносилася на підкладку із натрієво-вапняного скла за допомогою ВЧ-магнетронного осадження в роботі [33]. Її автори зазначають, що показник заломлення отриманої плівки становить 2,2450. Порівнюючи отримані результати (див. табл. 2) з літературними відомостями [33], можна припустити, що відношення HV найбільш точно дозволяє встановити значення показника заломлення.

Спектральна залежність $\alpha(h\nu)$ біля краю смуги виявляє експоненціальну залежність від енергії фотона і слідує емпіричній формулі Урбаха:

$$\alpha(h\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_u}\right) \quad (11)$$

де E_u – енергія Урбаха. Визначити параметри α та E_u можна за експериментальною залежністю $\alpha(h\nu)$ (див. рис. 5).

Значення енергії Урбаха E_u залежить від структурного розладу та температури матеріалу. Залежність цієї енергії від температури формується взаємодією електрона/екситонів з оптичними фононами [45].

Виявлено, що енергія Урбаха досліджених плівок ZnO:Al зростає із збільшенням вмісту алюмінію (див. табл. 3), що може бути спричинено збільшенням енергетичної ширини локалізованих енергетичних станів тонких плівок. Ця залежність може виникати внаслідок випадкових коливань внутрішніх полів, пов'язаних із структурними розладами у багатьох аморфних матеріалах. Експоненціальна залежність коефіцієнта оптичного поглинання від енергії фотонів може виникати внаслідок електронних переходів між локалізованими станами [46]. У багатьох випадках щільність станів верхньої валентності та нижньої зони провідності матеріалів залежить експоненційно від енергії в області найменшої ширини забороненої зони, що узгоджується з теорією Тауца.

Оптичні властивості тонких плівок (показник заломлення $n(\lambda)$, коефіцієнт поглинання $\alpha(\lambda)$, коефіцієнт екстинкції $k(\lambda)$, діелектричні функції $\epsilon(\lambda)$, оптична провідність $\sigma(\lambda)$ і товщину d) можна легко оцінити за результатами вимірювань спектру пропускання із використанням методу обвідних [46–48].

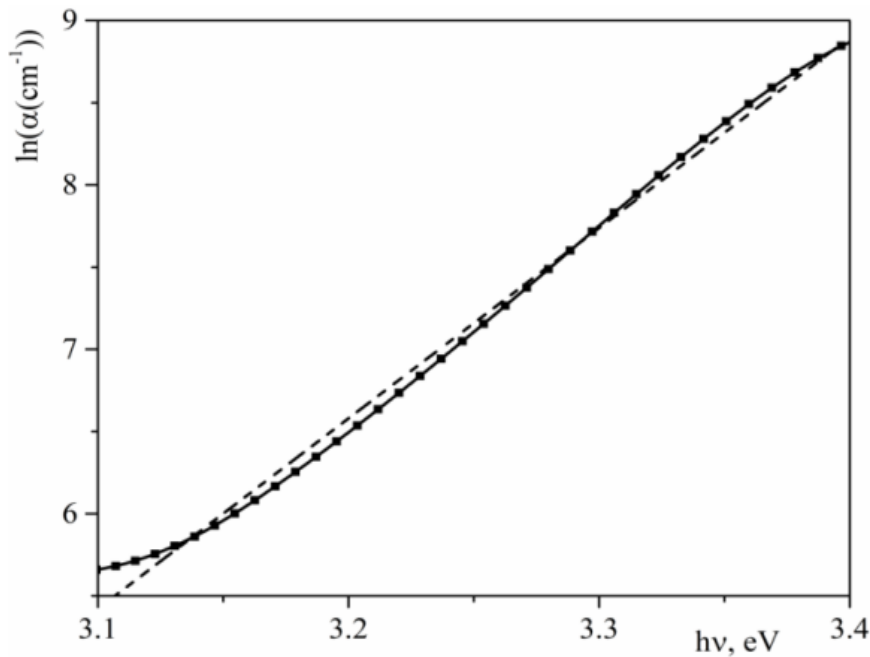


Рис. 5. Коефіцієнт оптичного поглинання α тонкої плівки ZnO:Al при кімнатній температурі

Таблиця 3

**Порівняльний аналіз оптичних параметрів встановлених з спектрів оптичного пропускання
для чистих та легованих тонких плівок оксиду цинку.**

Зразок	Метод осадження	d , nm	T_{average} , %	E_g , eV	E_u , meV	Джерело
ZnO:Al (2.5 wt.%)	ВЧ	455	77.78	3.26	86.32	Ця стаття
ZnO:Al	Спрей-піроліз	–	≥ 80 %	3.30	91	[49]
ZnO:Cu	Спрей-піроліз	–	≥ 70 %	3.27	98	[49]
ZnO:Sn	Спрей-піроліз	–	≥ 80 %	3.28	101	[49]
ZnO	Золь-гель	–	~ 90	3.29	367	[45]
ZnO:In (1.0 %)	Золь-гель	–	~ 90	3.26	390	[45]
ZnO	Покриття	–	≥ 80 %	3.288	–	[50]
ZnO:Fe-Ni (2 %)	Покриття	–	≥ 80 %	3.258	–	[50]
ZnO (1:1)	Золь-гелевий метод спінового покриття	–	≥ 85 %	3.37	–	[51]
ZnO (0 kGy)	ВЧ	134	–	3.26	116.71	[52]
ZnO	Спрей-піроліз	210	–	3	~ 730	[53]
ZnO:Sn (4 at.%)	Спрей-піроліз	223	–	3.25	~ 200	[53]
ZnO:Mn (4 at.%)	Спрей-піроліз	192	–	3.17	~ 210	[53]
ZnO:Al (4 at.%)	Спрей-піроліз	178	–	3.08	~ 400	[53]
ZnO	Золь-гель	–	~ 85 %	3.36	255	[54]
ZnO:Mg (6 wt.%)	Золь-гель	–	~ 85 %	3.73	307	[54]
ZnO	Спрей-пневматичний метод	149.65	~ 80 %	3.26	92	[55]
ZnO:NiO (3 %)	Спрей-пневматичний метод	101.4	~ 80 %	3.28	91	[55]
ZnO	Спрей-піроліз	~ 400	60–70%	~ 3.27	23.34	[56]
ZnO:Ni (5 at.%)	Спрей-піроліз	~ 400	60–70%	~ 3.27	~ 120	[56]

Цей метод застосовується у випадку слабопоглинаючого зразка з цілком прозорою підкладкою, яка набагато товстіша за досліджуваний зразок. Саме такі умови реалізовано в цій роботі. Обвідні $T_{\text{max}}(\lambda)$ і $T_{\text{min}}(\lambda)$ можна отримати за допомогою параболічних екстраполяцій експериментально визначених точок, які збігаються з місцем розташування максимумів та мінімумів інтерференційної картини (див. рис. 6).

Показник заломлення $n(\lambda)$ плівки ZnO:Al можна розрахувати за допомогою наступних співвідношень:

$$n = \sqrt{N + (N^2 - n_s^2)^{1/2}} \quad (12)$$

$$N = 2n_s \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} T_{\text{min}}} + \frac{2n_s^2 + 1}{2}$$

де n_s – показник заломлення підкладки (визначається з рівняння (13)).

$$n_s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\frac{1}{T_s^2} - 1} \quad (13)$$

T_s – коефіцієнт пропускання підкладки в області прозорості.

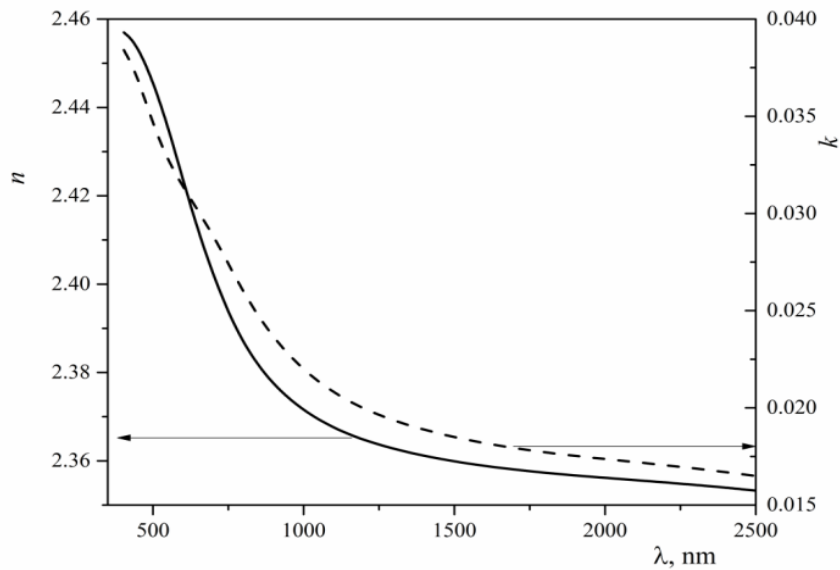


Рис. 6. Показник заломлення $n(\lambda)$ та коефіцієнт екстинкції $k(\lambda)$ плівки ZnO:Al при кімнатній температурі

Розрахований показник заломлення n дослідженої плівки зменшується із збільшенням довжини хвилі λ . Дисперсія $n(\lambda)$ є нормальною і може бути добре апроксимована моделлю одиночного осцилятора. На рис. 7 і 8, штрихові прямі лінії є функціями лінійної апроксимації дисперсій показника заломлення, що відповідають моделі одиночного осцилятора у формі, запропонованій Wemple і Di Domenico (14) [57].

$$n(h\nu)^2 - 1 \cong \frac{E_d \cdot E_0}{E_0^2 - (h\nu)^2}, \quad (14)$$

де E_0 – енергія одиночного осцилятора, E_d – енергія дисперсії, $h\nu$ – енергія фотона.

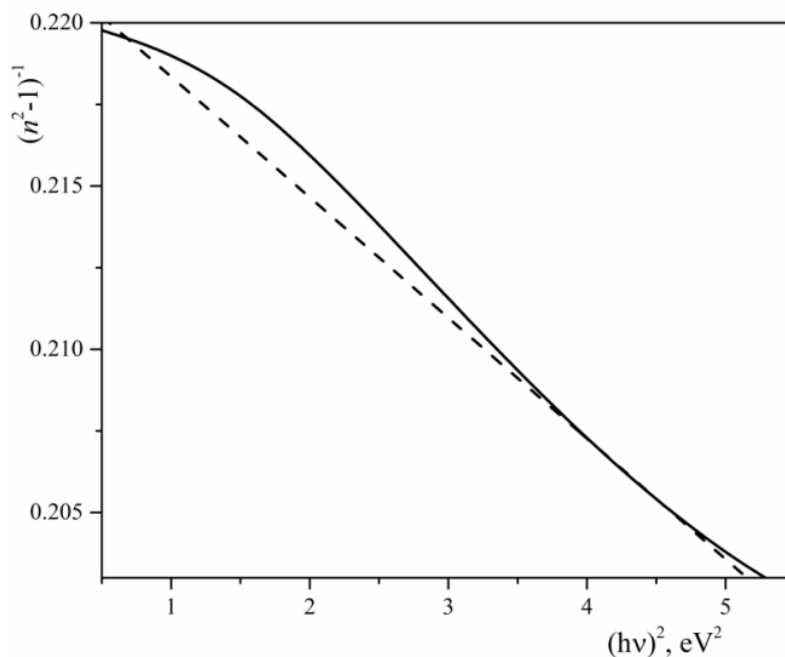


Рис. 7. Графік залежності $(n^2 - 1)^{-1} \sim (h\nu)^2$

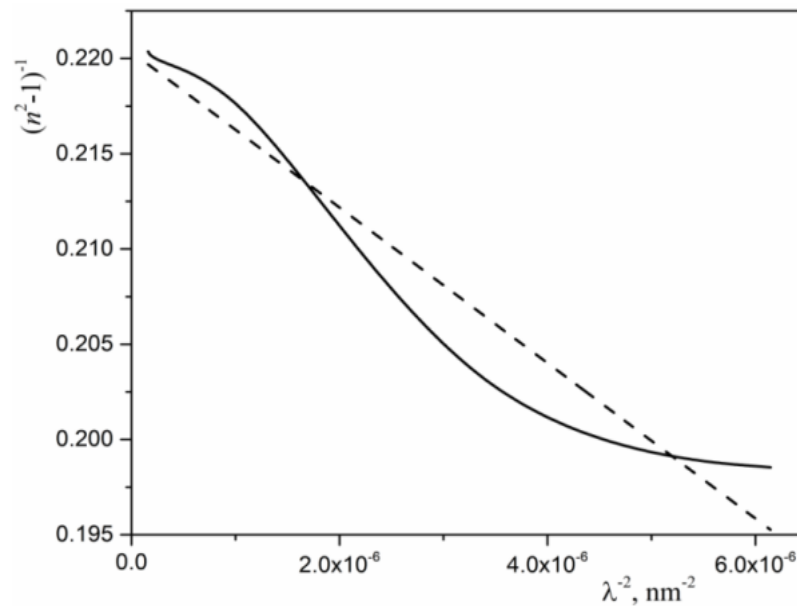


Рис. 8. Графік залежності $(n^2-1)^{-1} \sim \lambda^{-2}$

Обидва параметри E_0 та E_d , можна отримати з параметрів згаданої вище лінійної апроксимації $(n^2-1)^{-1} \sim (h\nu)^2$ залежності (14). Значення цих параметрів подано в таблиці 4.

Таблиця 4

Параметри апроксимації спектральної залежності показника заломлення плівок ZnO

Зразок	Метод осадження	E_0 , eV	E_d , eV	n_0	M_1	M_3 , eV ⁻²	f	λ_0 , nm	S_0 , nm ⁻²	Джерело
ZnO:Al (2.5 wt.%)	ВЧ	4.48	20.24	2.35	4.52	0.23	90.68	136.1	$2.5 \cdot 10^{-4}$	Дана робота
ZnO	Золь-гель	6.62	5.36	1.35	0.89	0.020	35.48	285	$1.06 \cdot 10^{-5}$	[45]
ZnO:In (1.0 %)	Золь-гель	6.80	8.56	1.50	0.81	0.017	58.20	305	$1.34 \cdot 10^{-5}$	[45]

Показник заломлення $n_0 = n(h\nu = 0)$ можна визначити, використовуючи співвідношення $n_0 = \sqrt{1 + \frac{E_d}{E_0}}$.

Значення n_0 зазвичай збільшується при легуванні оксиду цинку алюмінієм (див. табл. 4), що можна пояснити різними розмірами атомів при внесенні Al у структуру ZnO [58].

Моменти M_{-1} та M_{-3} оптичних спектрів можна отримати з наступних співвідношень [46]:

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}}, E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}}. \quad (15)$$

Отримані значення наведені в таблиці 4. Крім того, сила осцилятора (f) виражається згідно з Wemple та DiDomenico за наступною формулою [45]:

$$f = E_0 E_d \quad (16)$$

Легування алюмінієм плівку ZnO (ZnO:Al, 2,5 мас.%) призводить до збільшення значення сили осцилятора з 35,48 (ZnO [45]) до 90,68 eV² (див. табл. 4). Подібні коливання сили осцилятора для легованих тонких плівок спостерігались в інших дослідженнях [46], але чіткого розуміння такої поведінки сили осцилятора досі немає.

Показник заломлення $n(\lambda)$ в області прозорості може бути апроксимований, також, за допомогою рівняння Зельмєєра:

$$(n^2 - 1)^{-1} = \frac{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}{S_0 \lambda_0^2} \quad (17)$$

де S_0 – середня сила осцилятора, а λ_0 – середня довжина хвилі міжзонного осцилятора.

Коли графік залежності $(n^2-1)^{-1}$ від λ^{-2} апроксимувати прямою лінією, тоді значення S_0 і λ_0 можна визначити із співвідношення (17) та таблиці 4.

Відомо, що дійсні та уявні частини, ε_1 та ε_2 (рис. 9) є складовими комплексної діелектричної проникності ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2. \quad (18)$$

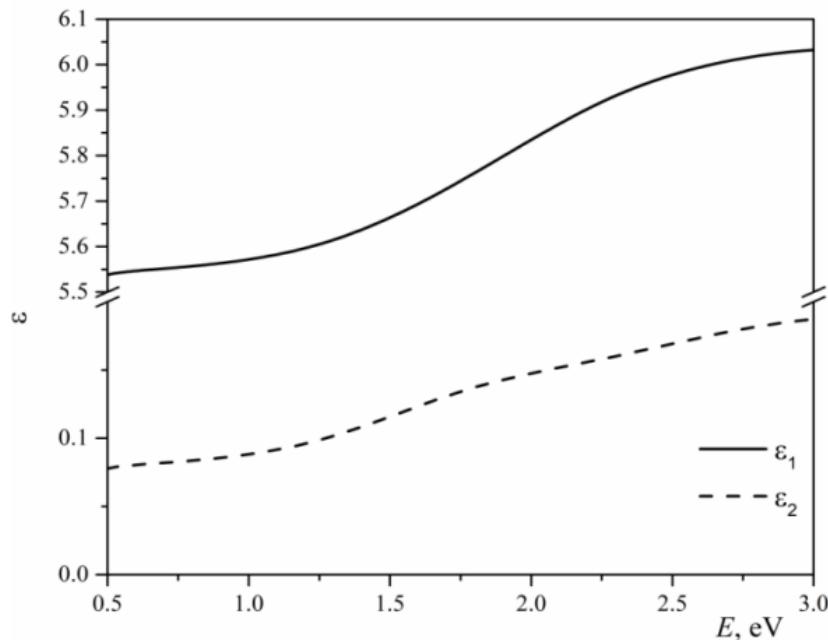


Рис. 9. Дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності ε плівки ZnO:Al

Їх можна визначити з спектральної поведінки показника заломлення n та коефіцієнта екстинкції k за рівняннями:

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (19)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (20)$$

Для значень n , набагато більших за k , значення ε_1 приблизно дорівнює n^2 , і залежність $\varepsilon_1(\lambda)$ можна встановити, використовуючи співвідношення (21).

$$\varepsilon_1 = n^2 = \varepsilon_\infty - \left(\frac{e^2}{\pi c^2} \right) \left(\frac{N_c}{m^*} \right) \lambda^2 \quad (21)$$

де c – швидкість світла, m^* – ефективна маса носія, N_c – щільність носіїв, e – електронний заряд, ε_∞ – високочастотна діелектрична проникність.

Для отримання високочастотної діелектричної проникності ε_∞ було побудовано графік n^2 як функцію від λ^2 та екстрапольовано лінійну частину кривої до $\lambda^2 = 0$ (див. рис. 10).

Крім того, дисперсія уявної частини діелектричної функції $\varepsilon_2(\lambda)$ була використана для оцінки часу релаксації (τ), оптичної рухливості (μ_{opt}) та оптичного опору (ρ_{opt}) в рамках моделі вільних електронів Друде [50, 59] використовуючи відношення (22)–(24).

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{e^2}{4\varepsilon_0\pi^3c^3} \right) \left(\frac{N_c}{m^*} \right) \left(\frac{1}{\tau} \right) \lambda^3. \quad (22)$$

Параметр τ знайдено з нахилу ділянки $\varepsilon_2 = f(\lambda^3)$, де значення (N_c/m^*) взято з рівняння (21). Потім оптичну рухливість μ_{opt} та оптичний опір ρ_{opt} плівок ZnO:Al розраховували за співвідношеннями (23) та (24) [59].

$$\mu_{opt} = \frac{e\tau}{m^*}, \quad (23)$$

$$\rho_{opt} = \frac{1}{e\mu_{opt}N_c}. \quad (24)$$

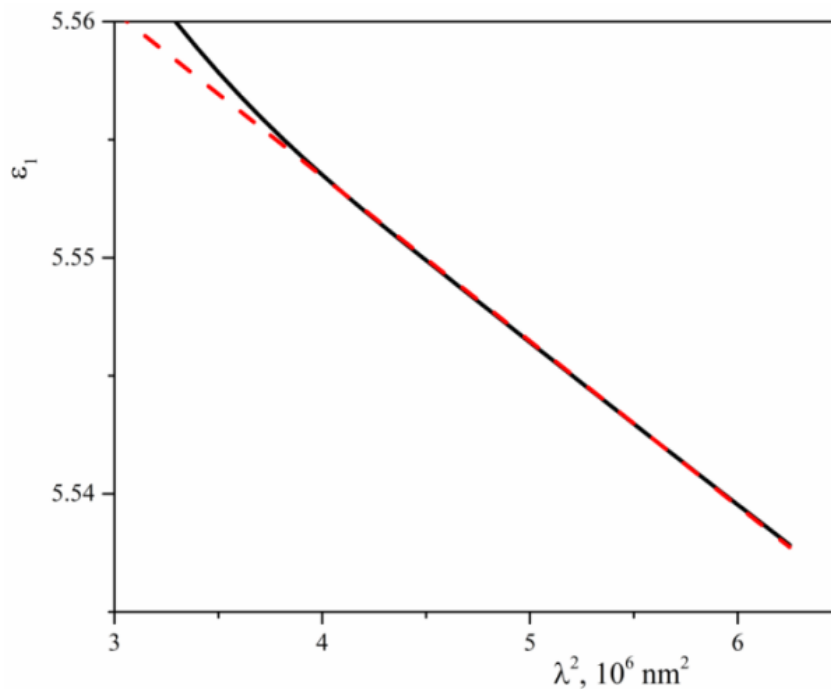


Рис. 10. Дійсна складова комплексної діелектричної проникності в координатах $\epsilon_1 = f(\lambda^2)$ для плівки ZnO:Al

Розраховані значення часу релаксації τ , оптичної рухливості μ_{opt} та оптичного опору ρ_{opt} представлені в таблиці 5. Встановлено, що легування алюмінієм плівок ZnO збільшує значення оптичної рухливості та часу релаксації, та що 2,5 мас.%. легування оксиду цинку алюмінієм призводить до вищих значень оптичної рухливості та часу релаксації, ніж для тонких плівок ZnO, легованих Fe–Ni [50].

Таблиця 5

Кінетичні параметри плівок ZnO отримані в рамках моделі вільних електронів Друде

Зразок	Метод осадження	ϵ_{∞}	$\left(\frac{N_c}{m^*}\right), \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$	$\mu_{\text{opt}}, \text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	$\rho_{\text{opt}}, \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	τ, s	ω_p, s^{-1}	Джерело
ZnO:Al	ВЧ	5.48	$1.23 \cdot 10^{57}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1.68 \cdot 10^{-14}$	$6 \cdot 10^8$	Дана робота
ZnO	Покриття	2.993	$1.208 \cdot 10^{57}$	$3.643 \cdot 10^{-3}$	$3.544 \cdot 10^{-6}$	$0.913 \cdot 10^{-14}$	$5.720 \cdot 10^7$	[50]
ZnO:Fe-Ni (2 %)	Покриття	3.562	$2.167 \cdot 10^{57}$	$5.095 \cdot 10^{-3}$	$1.412 \cdot 10^{-6}$	$1.276 \cdot 10^{-14}$	$8.620 \cdot 10^7$	[50]
ZnO	Золь-гель	2.14	$2.11 \cdot 10^{56}$	—	—	—	—	[45]
ZnO:In (1.0 %)	Золь-гель	2.71	$5.77 \cdot 10^{56}$	—	—	—	—	[45]

Крім того, частоту плазми (ω_p) розраховували за співвідношенням (25) [60]. Як і слід було очікувати, легування алюмінієм тонких плівок ZnO призводить до збільшення значення ω_p порівняно з чистим ZnO (див. табл. 5).

$$\omega_p = \left(\frac{e^2 N_c}{\epsilon_0 m^*} \right)^{1/2} \quad (25)$$

Коефіцієнт діелектричних втрат $\tan \delta$ визначається відомим співвідношенням:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (26)$$

Відповідна енергетична залежність $\tan \delta(E)$ представлена на рис. 11. Як відомо, складна оптична провідність $\sigma(\lambda)$ пов'язана зі складною діелектричною проникністю (12) [46]:

$$\sigma_1 = \omega \epsilon_2 \epsilon_0, \sigma_2 = \omega \epsilon_1 \epsilon_0 \quad (27)$$

де, ω — кутова частота, ϵ_0 — діелектрична проникність.

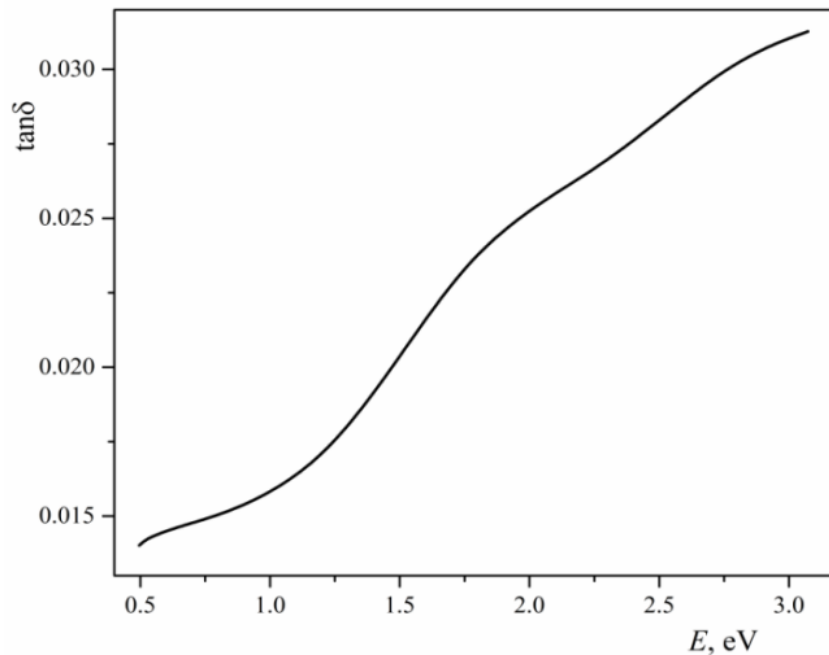


Рис. 11. Тангенс діелектричних втрат плівки ZnO:Al

Обидві компоненти σ_1 і σ_2 оптичної провідності σ зростають із збільшенням частоти ω (рис. 12).

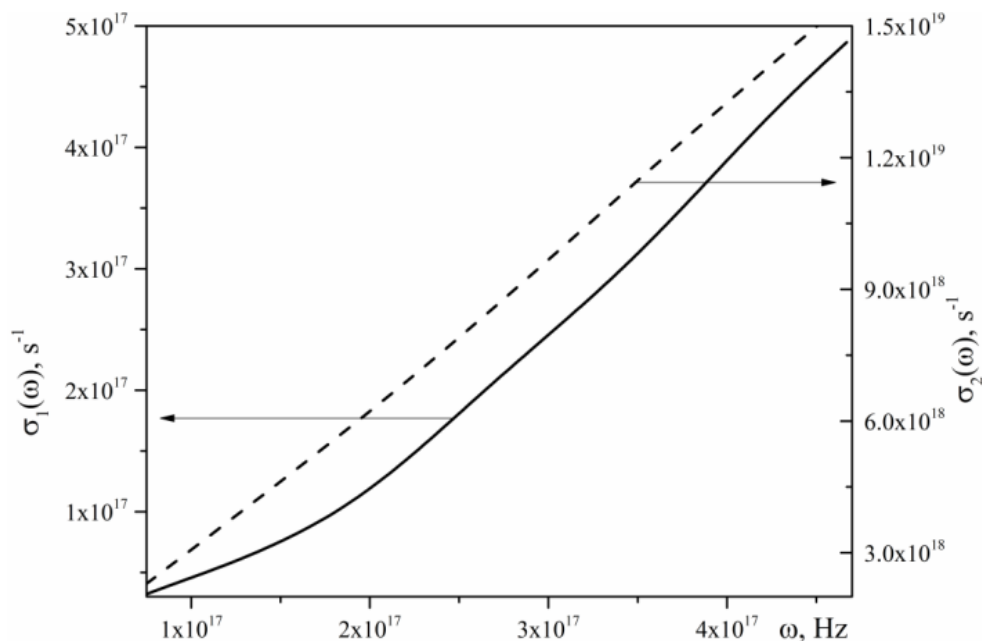


Рис. 12. Оптична провідність плівки ZnO:Al

Висновки. Оптичні характеристики плівок оксиду цинку з вмістом алюмінію 2,5 мас.% отримано методом ВЧ магнетронного осадження, досліджували за допомогою вимірювань коефіцієнта пропускання в спектральному діапазоні довжин хвиль 300–2500 нм. Отримані дані використовувались для розрахунку складної діелектричної функції $\epsilon = \epsilon_1 + i \cdot \epsilon_2$, комплексного показника заломлення $n = n_1 + i \cdot n_2$ та пов'язаних з ними оптичних функцій. Отримані дані аналізуються з використанням наближення Урбаха.

Встановлено значення оптичної ширини забороненої зони вказує на незначне її зростання в порівнянні з нелегованими плівками. Даний явище можна пояснити проявом ефекту Бурштейна–Мосса.

Одним з головних висновків є збільшення енергії Урбаха для плівок ZnO:Al у порівнянні з нелегованими. Ймовірно, це спричинено збільшенням енергетичної ширини локалізованих електронних енергетичних станів тонких плівок внаслідок збільшення атомного розладу. Також, було виявлено майже подвійне збільшення значення сили оптичного генератора для досліджуваної тонкої плівки.

Вперше, було оцінено кілька електронно-оптичних (кінетичних) параметрів моделі вільних електронів Друде (час релаксації, оптична рухливість та оптичний опір) для досліджених плівок. Легування тонких плівок оксиду цинку алюмінієм призводить до збільшення оптичної рухливості, часу релаксації та частоти плазми, що було виявлено порівнянням з довідковими даними для нелегованого ZnO.

Отримані оптичні параметри плівок ZnO:Al дозволяють рекомендувати дані зразки для застосування в оптоелектронних приладах.

Подяка

Робота виконана в рамках проекту для молодих вчених № 0121U108649 Міністерства освіти і науки України.

Література

1. R.E. Treharne, A. Seymour-Pierce, and K. Durose, Journal of Physics: Conference Series, 286, 012038 (2011).
2. D.M. Bagnall et al., J. Crystal Growth, 184-185, 605 (1998).
3. C.H. Ahn et al., Physica B. 401-402, 370 (2007).
4. H.S. Kang et al., Appl. Phys. Lett., 89, 181103 (2006).
5. V.M. Latyshev et al. Solid State Sciences. 67, 109 (2017).
6. O. Dobrozhan et al., Materials Science in Semiconductor Processing, 102, 104595 (2019).
7. V.M. Zhyrovetsky et al., Nanoscale Research Letters, 12, 132 (2017).
8. R.V. Bovhyra et al., Applied Nanoscience (Switzerland), 9, 775 (2019).
9. X. Sun, and H. Kwork, J. of Appl. Phys., 86, 408 (1999).
10. N. Bouchenak Khelladi, and N.E. Chabane Sari, Advances in Materials Science, 13, 21 (2013).
11. D. Zhang D. et al., Appl. Surf. Sci., 158, 43 (2000).
12. A. Samavati et al., RSC Adv., 7, 35858 (2017).
13. J.-L. Deschanvres, B. Bochu, and J.-C. Joubert, J. Phys. IV., 3, 3485 (1993).
14. M. Berber et al., Scr. Mater., 53, 547 (2005).
15. C. Manoharan et al., Appl. Nanosci., 6, 815 (2016).
16. E.P. da Silva et al., Materials Sciences and Applications, 4, 761 (2013).
17. A. Douayar et al., Appl. Phys. B., 110, 419 (2013).
18. H. Munawaroh, S. Wahyuningsih, and A.H. Ramelan, Journal of Nano- and Electronic Physics, 11, 04028(5pp) (2019).
19. A. Douayar et al., Journal of Alloys and Compounds, 550, 345 (2013).
20. G.P. Bharti, and A. Khare, Optical Materials Express, 6, 2063 (2016).
21. E.M. El Jald et al., Optik. 124, 6302 (2013).
22. R.K. Jamal, M.A. Hameed, and K.A. Adem, Materials Letters. 132, 31 (2014).
23. H.S. Bolarinwa et al., Journal of Taibah University for Science, 352, S1658365517300079 (2017).
24. M. Gabas et al., J. Appl. Phys., 113, 163709 (2013).
25. O. Bovgyra et al., Journal of Physical Studies. 23(4), 4301 (2019).
26. V.B. Kapustianyk et al., Journal of Applied Spectroscopy, 82(1), 153 (2015).
27. V. Kusnezh et al., Journal of Alloys and Compounds, 746, 471 (2018).
28. A.B. Danylov et al., Journal of Nano- and Electronic Physics, 10, 05011 (2018).
29. R. Petrus et al., Journal of Nano- and Electronic Physics. 11, 03020 (2019).
30. R.Y. Petrus et al., Optics and Spectroscopy. 126, 220 (2019).
31. P. Scherrer, Göttinger Nachrichten Math.Phys., 2, 98 (1918).
32. S. Prabahar, and M. Dhanam, J. Cryst. Growth., 285, 41 (2005).
33. R.E. Treharne et al., J. Phys: Conf. Ser., 286, 012038 (2011).
34. W.L. Bond, J. Appl. Phys., 36, 1674 (1965).
35. C. Stelling et al., Sci. Rep., 7, 42530 (2017).
36. T. Moss, Proc. Phys. Soc. B., 63(3), 167 (1950).
37. D.R. Penn, Phys. Rev., 128(5), 2093 (1962).
38. N.M. Ravindra, S. Auluck, and V.K. Srivastava, Phys. Stat. Sol. (B), 93, K155 (1979).
39. P.J.L. Herve, and L.K.J. Vandamme, Infrared Phys., 35(4), 609 (1994).
40. P.J.L. Herve, and L.K.J. Vandamme, J. Appl. Phys., 77(10), 5476 (1995).
41. R.R. Reddy et al., Opt. Matter. 31(2), 209 (2008).
42. R.R. Reddy et al., J. Alloys and Compounds, 473(1-2), 28 (2009).
43. M. Anani et al., Computational Mat.Sc. 41(4), 570 (2008).
44. S.K. Tripathy, Optical materials. 46, 240 (2015).
45. A. Kocyigit, M.O. Erdal, M. Yildirim, Zeitschrift für Naturforschung. 74, 1-9 (2019).

46. Y. Caglar, S. Ilican, M. Caglar, Eur. Phys. J. B. 58, 251–256 (2007).
47. H. Ilchuk, et al., Molecular Crystals and Liquid Crystals. 699, 1-8 (2020).
48. L.I. Nykyruy, et al., Optical Materials, 92, 319-329 (2019).
49. F.Z. Bedia, et al., A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems. Advanced Structured Materials. 128, 107-119 (2020).
50. A.M. Alsaad, et al., Materials. 13, 1737 (2020).
51. I.S. Yahia, et al., Superlattices and Microstructures. 53, 63–75 (2013).
52. A.E. Youssef, M.H. Abd-El Salam, Radiation Effects and Defects in Solids. 175, 791-808 (2020).
53. M.N. Amroun, et al., Int. J. Thin. Film. Sci. Tec. 9, 7-19 (2020).
54. M.R. Islam, M.G. Azam, Surface Engineering. (2020).
55. Y. Aoun, et al., Physics of the Solid State. 62, 131–136 (2020).
56. L. Herissi, et al., Nano Hybrids and Composites. 27, 21-29 (2019).
57. A. Kashuba, et al., Modern Physics Letters B. 35, 2150189 (2021).
58. C.E. Benouis, et al., J. Alloys Compounds. 490, 62-67 (2010).
59. A.Y. Fasasi, et al., Am. J. Mater. Synth. Process. 3, 12-22 (2018).
60. F. Yakuphanoglu, M. Sekerci, Journal of Molecular Structure. 751, 200–203 (2005).

Reference

1. R.E. Treharne, A. Seymour-Pierce, and K. Durose, Journal of Physics: Conference Series, 286, 012038 (2011).
2. D.M. Bagnall et al., J. Crystal Growth, 184-185, 605 (1998).
3. C.H. Ahn et al., Physica B. 401-402, 370 (2007).
4. H.S. Kang et al., Appl. Phys. Lett., 89, 181103 (2006).
5. V.M. Latyshev et al. Solid State Sciences. 67, 109 (2017).
6. O. Dobrozhan et al., Materials Science in Semiconductor Processing, 102, 104595 (2019).
7. V.M. Zhyrovetsky et al., Nanoscale Research Letters, 12, 132 (2017).
8. R.V. Bovhyra et al., Applied Nanoscience (Switzerland), 9, 775 (2019).
9. X. Sun, and H. Kwork, J. of Appl. Phys., 86, 408 (1999).
10. N. Bouchenak Khelladi, and N.E. Chabane Sari, Advances in Materials Science, 13, 21 (2013).
11. D. Zhang D. et al., Appl. Surf. Sci., 158, 43 (2000).
12. A. Samavati et al., RSC Adv., 7, 35858 (2017).
13. J.-L. Deschanvres, B. Bochu, and J.-C. Joubert, J. Phys. IV., 3, 3485 (1993).
14. M. Berber et al., Scr. Mater., 53, 547 (2005).
15. C. Manoharan et al., Appl. Nanosci., 6, 815 (2016).
16. E.P. da Silva et al., Materials Sciences and Applications, 4, 761 (2013).
17. A. Douayar et al., Appl. Phys. B., 110, 419 (2013).
18. H. Munawaroh, S. Wahyuningsih, and A.H. Ramelan, Journal of Nano- and Electronic Physics, 11, 04028(5pp) (2019).
19. A. Douayar et al., Journal of Alloys and Compounds, 550, 345 (2013).
20. G.P. Bharti, and A. Khare, Optical Materials Express, 6, 2063 (2016).
21. E.M. El Jald et al., Optik. 124, 6302 (2013).
22. R.K. Jamal, M.A. Hameed, and K.A. Adem, Materials Letters. 132, 31 (2014).
23. H.S. Bolarinwa et al., Journal of Taibah University for Science, 352, S1658365517300079 (2017).
24. M. Gabas et al., J. Appl. Phys., 113, 163709 (2013).
25. O. Bovgyra et al., Journal of Physical Studies. 23(4), 4301 (2019).
26. V.B. Kapustianyk et al., Journal of Applied Spectroscopy, 82(1), 153 (2015).
27. V. Kusnezsh et al., Journal of Alloys and Compounds, 746, 471 (2018).
28. A.B. Danylov et al., Journal of Nano- and Electronic Physics, 10, 05011 (2018).
29. R. Petrus et al., Journal of Nano- and Electronic Physics. 11, 03020 (2019).
30. R.Y. Petrus et al., Optics and Spectroscopy. 126, 220 (2019).
31. P. Scherrer, Göttinger Nachrichten Math.Phys., 2, 98 (1918).
32. S. Prabhar, and M. Dhanam, J. Cryst. Growth., 285, 41 (2005).
33. R.E. Treharne et al., J. Phys: Conf. Ser., 286, 012038 (2011).
34. W.L. Bond, J. Appl. Phys., 36, 1674 (1965).
35. C. Stelling et al., Sci. Rep., 7, 42530 (2017).
36. T. Moss, Proc. Phys. Soc. B., 63(3), 167 (1950).
37. D.R. Penn, Phys. Rev., 128(5), 2093 (1962).
38. N.M. Ravindra, S. Auluck, and V.K. Srivastava, Phys. Stat. Sol. (B), 93, K155 (1979).
39. P.J.L. Herve, and L.K.J. Vandamme, Infrared Phys., 35(4), 609 (1994).
40. P.J.L. Herve, and L.K.J. Vandamme, J. Appl. Phys., 77(10), 5476 (1995).
41. R.R. Reddy et al., Opt. Matter. 31(2), 209 (2008).
42. R.R. Reddy et al., J. Alloys and Compounds, 473(1-2), 28 (2009).
43. M. Anani et al., Computational Mat.Sc. 41(4), 570 (2008).
44. S.K. Tripathy, Optical materials. 46, 240 (2015).
45. A. Kocuyigit, M.O. Erdal, M. Yildirim, Zeitschrift für Naturforschung. 74, 1-9 (2019).
46. Y. Caglar, S. Ilican, M. Caglar, Eur. Phys. J. B. 58, 251–256 (2007).
47. H. Ilchuk, et al., Molecular Crystals and Liquid Crystals. 699, 1-8 (2020).
48. L.I. Nykyruy, et al., Optical Materials, 92, 319-329 (2019).
49. F.Z. Bedia, et al., A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems. Advanced Structured Materials. 128, 107-119 (2020).
50. A.M. Alsaad, et al., Materials. 13, 1737 (2020).

-
51. I.S. Yahia, et al., Superlattices and Microstructures. 53, 63–75 (2013).
 52. A.E. Youssef, M.H. Abd-El Salam, Radiation Effects and Defects in Solids. 175, 791-808 (2020).
 53. M.N. Amroun, et al., Int. J. Thin. Film. Sci. Tec. 9, 7-19 (2020).
 54. M.R. Islam, M.G. Azam, Surface Engineering. (2020).
 55. Y. Aoun, et al., Physics of the Solid State. 62, 131–136 (2020).
 56. L. Herissi, et al., Nano Hybrids and Composites. 27, 21-29 (2019).
 57. A. Kashuba, et al., Modern Physics Letters B. 35, 2150189 (2021).
 58. C.E. Benouis, et al., J. Alloys Compounds. 490, 62-67 (2010).
 59. A.Y. Fasasi, et al., Am. J. Mater. Synth. Process. 3, 12-22 (2018).
 60. F. Yakuphanoglu, M. Sekerci, Journal of Molecular Structure. 751, 200–203 (2005).

УДК 519.62:532.5:681.516.75:004.932.2

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-14

САФОНІК А. П., ГРИЦЮК І. М., МІЩАНЧУК М. М.,
Національний університет водного господарства та природокористування
ІЛЬКІВ І. В.

Рівненський державний гуманітарний університет

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОТРИМАННЯ КОАГУЛЯНТУ НА ОСНОВІ ФОТОКОЛОРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ

Розроблена модельна задача для процесу електрокоагуляційного очищення промислових стічних вод з урахуванням зміни напруги і сили струму. Проведено комп'ютерне моделювання зміни концентрації заліза на виході з електрокоагулятора з часом при змінній величині струму. Розроблена структура лабораторної установки інформаційної системи електрохімічного отримання коагулянту на основі фотоколометричного аналізу на базі якої проведено експериментальне дослідження процесу, визначено концентрацію загального та трьохвалентного заліза, силу струму та колірність речовини в різні моменти часу зі зміною напруги. В ході опрацювання результатів побудовано графічні залежності RGB-складових кольору води та відповідної концентрації загального заліза і Fe^{3+} у воді.

Ключові слова: фотоколометричний аналіз, інформаційна система електрохімічного отримання коагулянту, RGB.

A. SAFONYK, I. HRYTSIUK, M. MISHCHANCHUK

¹National University of Water and Environmental Engineering

I. ILKIV

Rivne State University of Humanities

INFORMATION SYSTEM OF ELECTROCHEMICAL OBTAINING OF COAGULANT ON THE BASIS OF PHOTOCOLORIMETRIC ANALYSIS

The development of technology, demand for goods and natural resources have led to increased pollution of the aquatic environment and the environment in general. Therefore, many scientists and environmentalists give priority to programs to clean the aquatic environment and improve the state of the ecosystem. Currently, water quality has declined dramatically and has a detrimental effect on aquatic ecosystems, nature and humanity. All this leads to the need to introduce techniques and methods for wastewater treatment and control. The effectiveness of any cleaning method is characterized by the quality, time required to perform it, the use of resources and a number of other parameters.

A model problem for the process of electrocoagulation treatment of industrial wastewater taking into account changes in voltage and current is developed. Computer simulation of the change in the concentration of iron at the outlet of the electrocoagulator over time at a variable current was performed. The structure of the laboratory installation of the information system of electrochemical coagulant production is developed on the basis of photocolometric analysis on the basis of which an experimental study of the process is carried out. During the processing of the results, graphical dependences of RGB-components of water color and the corresponding concentration of total iron and Fe^{3+} in water were constructed.

Key words: photocolometric analysis, information system of electrochemical coagulant production, RGB.

Постановка проблеми. Розвиток технологій, попиту на товари та природні ресурси призвели до збільшення забруднення водного середовища та екології в цілому. Тому багато науковців та екологів надають пріоритети програмам з очищення водного середовища та покращення стану екосистеми. На даний час якість води надзвичайно знизилась та несе згубний вплив на водні екосистеми, природу та людство. Все це приводить до необхідності запровадження прийомів та методів для очистки та контролю стічних вод. Ефективність будь-якого методу очищення характеризується якістю, часом, що необхідний для його виконання, використанням ресурсів та низкою інших параметрів.

На практиці водопідготовки все частіше знаходять застосування невеликі установки реагентної очистки стічних вод. Обладнання станцій очистки води такими установками особливо є актуальним для об'єктів сільського господарства, легкої промисловості тощо. Однак використання реагентів потребує створення служби доставки і зберігання. Електрохімічні методи дозволяють отримувати реагенти на місці із доступної сировини. Один із таких методів – метод електрокоагуляції. Метод електрокоагуляції є передовим в напрямку очищення стічних вод, використовується довгі роки та не перестає розвиватися до тепер. Останнім часом все більшої уваги приділяється дослідженню даного процесу засобами математичного моделювання, оскільки це сприяє покращенню конструкцій обладнання, експлуатаційних витрат та може передбачити ефективність процесу в широкому діапазоні функціонування з мінімальними затратами на виробництво. Крім цього, відповідні дослідження дають підґрунтя для розробки автоматизованих систем керування процесами електрокоагуляції. Як і в більшості аналогічних випадків, процес отримання коагулянту електрокоагуляційним методом передбачає проведення складних і дороговартісних натурних експериментів із визначення вмісту корисного елементу (заліза) в коагулянті. Один із методів лабораторного визначення заліза в коагулянті є фотоколометричний метод. Розвиток технологій поглинання світла

обумовленою речовиною у видимій області спектра перетворюючи світлову енергію в енергію електричну, так звані технології фотоколометрії, дозволяють оцінити якісні показники багатокомпонентних сполук з більшою точністю та швидкістю. Крім того, відповідно до стандартизованих методів визначення вмісту заліза у воді відносять спосіб фотоколориметричного аналізу, адже при зміні концентрації заліза змінюється інтенсивність забарвлення досліджуваної води а також змінюється оптична густина середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість аспектів електрокоагуляційної очистки стічних вод недостатньо вивчені та продовжують удосконалюватися до тепер. Велика кількість авторів [1–3] приділяють свою увагу на дослідження таких параметрів як рН, температура, концентрацію забруднюючих речовин та не приділяючи часу на дослідження колірності отриманої речовини. Робота [2] розглядає основні принципи безперервної обробки води та розробку відповідних моделей, що зосереджуються на різних типах забруднювачів при ряді умов експлуатації. Дослідження [3] описує експерименти проведені для оцінки ефективності очищення води, що включає в себе вимірювання: помутніння, рН, провідність, температура та насиченість киснем. Робота [4] показує розробку моделі очистки стічних вод методом електрокоагуляції враховуючи оптимальні умови безперервної роботи системи при змінній густині струму. Автор [5] описує розподіл струму та потік рідини моделюючи їх як дифузійний процес проводячи натурні та комп'ютерні експерименти для перевірки адекватності моделі. Дослідження [6] наглядно демонструє процес електрокоагуляції та експерименти на працюючому устаткуванні очисних споруд. В свою чергу автори [7] досліджують ступінь і дисперсність забруднень, що утворюються на пластинах при різному часі електрокоагуляції та зміні полярності. Продовжує попереднє дослідження автор [8] та в своїй статті проводить наглядні експерименти демонструючи зміну осадів, що отримані шляхом електрокоагуляції на пластинах при змінному струмі та зображує осад отриманий при різному стані електроліту. В роботі [12] був виготовлений цифровий колориметр для визначення вмісту заліза з програмним додатком, що реєструє компоненти кольору, зберігаючи значення червоного, зеленого та синього кольорів, а також обчислюючи значення відтінку, насиченості, яскравості та сірого, використовуючи стандартну теорію кольорів, а в роботі [16] розроблений недорогий портативний пристрій для колориметричного аналізу на місцях. Автор [13] визначає концентрацію заліза в питних водах відповідно до нормативних зразків United States Environmental Protection Agency. Дослідження авторів [14] проводиться за допомогою веб-камери, що визначає вміст заліза в водах використовуючи цифрову колориметрію зображень. Основним методом даного дослідження є регресія найменших квадратів для отримання квадратного рівняння на основі червоного, зеленого та синього відтінків, насиченості та яскравості кольорів, що дозволило оцінити максимально точно аналіз що проводився. Робота [15] концентрується на порівнянні двох методів визначення концентрації хрому (Cr) та заліза (Fe), де перший метод заснований на простій лінійній регресії окремого кольору R, G або B, а другий метод сформований на теорії найменших квадратів усіх трьох кольорів R, G та B. Проте всі наведені роботи опираються на натурні експерименти, де концентрації корисного елементу визначаються лабораторним способом, що є затратно як матеріально так і з точки зору використаного часу.

Відповідно до сказаного, актуальною задачею є розробка автоматизованої системи електрохімічного отримання коагулянту на основі фотоколориметричного аналізу.

Постановка задачі. Для проектування експериментальної установки варто синтезувати математичну модель, що буде описувати процес електрокоагуляції для промислових стічних вод враховуючи зміну напруги і сили струму. Це в свою чергу дасть можливість порівняти результати теоретичних досліджень з експериментальними, а також дати оцінку відповідності розробленої моделі протікання процесів електрокоагуляції реальним даним. З огляду на те, що при зміні концентрації заліза у воді змінюється колір та інтенсивність забарвлення розчину експериментальну установку для лабораторних досліджень було вирішено доповнити цифровою підсистемою аналізу кольору та інтенсивності світлового потоку.

Математична модель. Для дослідження процесу електрокоагуляційної очистки рідини узагальнено розроблену в [9] математичну модель з урахуванням міркувань [10, 11]. Особливостями даної постановки є те, що вона враховує процеси, які проходять в реакторі та впливають на проходження процесу, як взаємодію різних факторів: концентрації завислих речовин у воді, прикладеної сили струму, швидкості потоку та температур рідини, зовнішнього середовища, води в реакторі, конструктивних параметрів коагулятора. Таким чином, для знаходження розподілів концентрації коагулянту C та температури T в електрокоагуляторі прийдемо до наступної модельної задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = -v_c \nabla C + \nabla (D_c(T) \nabla C) + f_c(T)C + \Phi, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -v_T \nabla T + D_T \Delta T + \Psi, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= C_0(x), \quad T(x, 0) = T_0(x), \\ C(0, t) &= C^0(t), \quad T(0, t) = T^0(t), \quad \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де D_T – коефіцієнти дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$), q_T – інтенсивність внутрішніх джерел теплоти, v_c – швидкість поширення коагулянту ($\text{м}/\text{с}$), v_T – швидкість поширення температури ($\text{м}/\text{с}$), c_T – теплоємність ($\text{Дж}/\text{кг}$), ρ – густина ($\text{кг}/\text{м}^3$) L – довжина коагулятора (м), H – висота коагулятора (м), B – ширина коагулятора (м).

Під час електрокоагуляції відбувається нагрівання розчину електроліту. Кількість теплоти $\Psi = \frac{q_T}{c_T \rho}$, яка при цьому виділяється, пропорційна величині струму, часу його проходження і падінню напруги $q_T = I \cdot U \cdot t$, U – прикладена напруга (В), I – величина струму (А), $f_c(T) = \eta \frac{3R_g T I}{8F d_b A_s P}$ – функція, яка враховує флотаційну складову процесу, R_g – газова константа ($\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$), d_b – діаметр бульбашок (м), P – це атмосферний тиск (Па), A_s – площа поперечного перерізу камери (м^2) та η – ефективність накопичення однією бульбашкою – визначається як частка забруднюючої речовини на шляху бульбашки, які фактично налипають на бульбашку. Дифузійний рух частинок в рідині можна розглядати як рух з тертям, до нього може бути застосовано друге співвідношення Ейнштейна: $D_c(T) = U_c k T$. Тут k – стала Больцмана ($\text{Дж}/\text{К}$), U_c – рухливість дифундуючих частинок, тобто коефіцієнт пропорційності між швидкістю частинки і рушійною силою ($\text{Па}\cdot\text{с}\cdot\text{м}$). Якщо частки сферично симетричні, то $U_c = 1/(6\pi h r)$, де h – коефіцієнт в'язкості рідини, r – радіус частинки. В [10] також запропоновано числові вирази для розрахунку η . $\Phi = \frac{I t}{V_A n F} + k_h S_k t$ – функція що відповідає за електрохімічну реакцію, тут V_A – об'єм апарата (м^3), n – кількість електронів реакції, F – стала Фарадея ($\text{Кл}/\text{моль}$), k_h – константа швидкості гетерогенної реакції ($\text{моль}/\text{м}^2\cdot\text{с}$), S_k – площа катода (м^2).

Для дослідження модельної задачі (1)-(2) використаємо додаток `pdere` програмного середовища Matlab, який дає можливість знаходити розв'язок рівнянь параболічного та еліптичного типів, досліджувати вплив параметрів в даних системах.

Для отримання розв'язку на основі додатку `pdere` необхідно розробити 4 файли, які описують: задану систему рівнянь (`pdex2pde.m`), початкові умови (`pdex2ic.m`), граничні умови (`pdex2bc.m`) та головну функцію (`main.m`).

У файлі `pdex2pde.m` спочатку необхідно перетворити систему рівнянь (1) в машинний код:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = -v_c \nabla C + \nabla(D_c(T) \nabla C) + f_c(T)C + \Phi, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -v_T \nabla T + D_T \Delta T + \Psi, \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right),$$

Вміст `m`-файлу `coagul_pdex2pde.m` представлено на рис. 1.

```
function [c, f, s] = coagul_pdex2pde (x, t, u, DuDx)
n=0.8; Rg=8.31; I=70;
F=96500; db=1.5*10^-6; As=15; p=101325;
a=0.00012; Lm=0.39*10; L=0.4; U=24; qv=1; c=3310; po=1060;

V1=0;
D1=10^-9;

c1=1; c2=1/a; f1=D1*DuDx(1)-V1*u(1); f2=Lm/L*DuDx(2);

s1=(n*3*Rg*u(2)*I/(8*F*db*As*P)/2.9/(10^-2*(t+1)))*u(1);
s2=I*U*exp(8.8/(0.01*t+1))/(c*po*a);
c = [c1; c2];
f = [f1; f2];
s = [s1; s2];
end
```

Рис. 1. Скріншот програмного коду файлу `coagul_pdex2pde.m`

Початкові умови:

$$\begin{cases} C_0(x, t_0) = 0.1, \\ T_0(x, t_0) = 20. \end{cases} \Leftrightarrow u(x, t_0) = u_0(x).$$

Вміст m-файлу *coagul_pdex2ic.m* представлено на рис. 2.

```
function u0 = coagul_pdex2ic(x)
    u10=0.1;
    u20=20;
    u0 = [u10;u20];
end
```

Рис. 2. Скріншот програмного коду файлу *coagul_pdex2ic.m*

Граничні умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial C^0(x_L, t)}{\partial x} = 0, & \frac{\partial C^0(x_R, t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T^0(x_L, t)}{\partial x} = 0, & \frac{\partial T^0(x_R, t)}{\partial x} = 0. \end{cases} \Leftrightarrow p(x, t, u) + q(x, t) \cdot f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) = 0.$$

Вміст m-файлу *coagul_pdex2bc.m* представлено на рис. 3.

```
function [p1,q1,pr,qr] = coagul_pdex2bc(xl,ul,xr,ur,t)
    p1=[0;0];
    q1=[1;1];
    pr=[0;0];
    qr=[1;1];
end
```

Рис. 3. Скріншот програмного коду файлу *coagul_pdex2bc.m*

Для опису головної функції *pdepe* використаємо m-файл *coagul_pdepe.m*, який представлено на рис. 4.

```
m=0;
x=linspace(0,0.6,101);
t=linspace(0,250,101);

sol = pdepe(m, @coagul_pdepe2pde, @coagul_pdex2ic, @coagul_pdex2bc, x, t);
u1 = sol(:,:,1);
u2 = sol(:,:,2);
```

Рис. 4. Скріншот програмного коду файлу *coagul_main.m*

Результати моделювання за вхідних даних: $\nu = 0.12$ м/с; $\eta = 0.8$; $R_g = 8.31$, Дж/(моль · К); $F = 9.65 \cdot 10^4$, Кл/моль; $A_s = 15$, м²; $d_b = 1.5 \cdot 10^{-6}$, м; $U = 24$, В; $a = 0.12 \cdot 10^{-3}$, м²/с; $\lambda_m = 0.39$, Вт/м · с; $a_2 = 880$; $\lambda = 0.4$, Вт/м · с; $c = 3.31 \cdot 10^3$, Дж/кг; $\zeta = 1060$, кг/м³; $a_1 = 290$; $D = 10^{-9}$, м²/с, представлено на рис. 5.

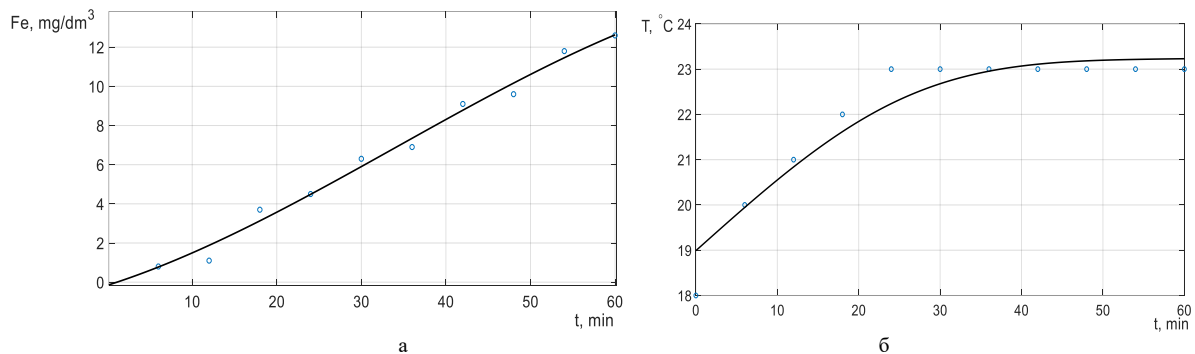


Рис. 5. Розподіл:

а) концентрації тривалентного заліза з часом на виході з коагулятора; б) температури води з часом

Для дослідження впливу величини струму на концентрацію тривалентного заліза використовуємо результати комп'ютерного моделювання на основі задачі (1)–(2). При цьому всі параметри моделі такі як: величина прикладеної напруги, конструктивні розміри реактора, характеристики води, час моделювання залишили сталими. Міняючи величину струму отримали різні результати зміни температури води та концентрації тривалентного заліза. Отримані результати представлено на рис. 6.

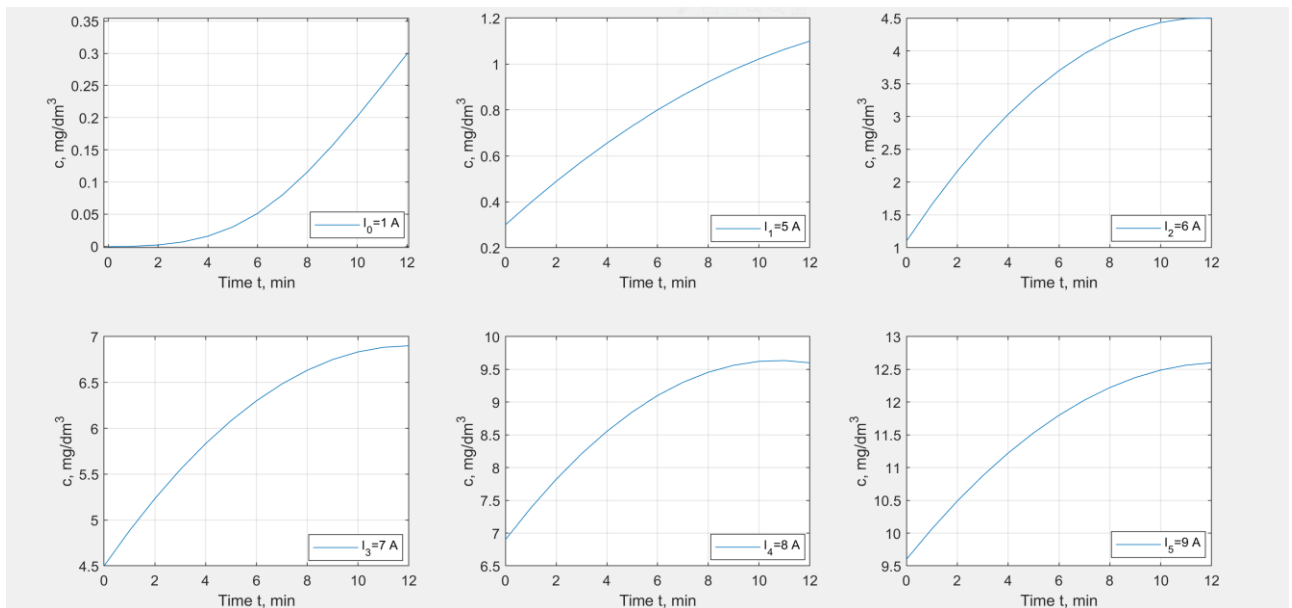


Рис. 6. Зміна концентрації заліза на виході з коагулятора з часом при величині струму $I_0=1\text{ A}$, $I_1=5\text{ A}$, $I_2=6\text{ A}$, $I_3=7\text{ A}$, $I_4=8\text{ A}$, $I_5=9\text{ A}$

Проектування лабораторної установки. Відповідно до поставленої мети, була розроблена структура лабораторної установки для дослідження процесів електрокоагуляції (рис. 7):

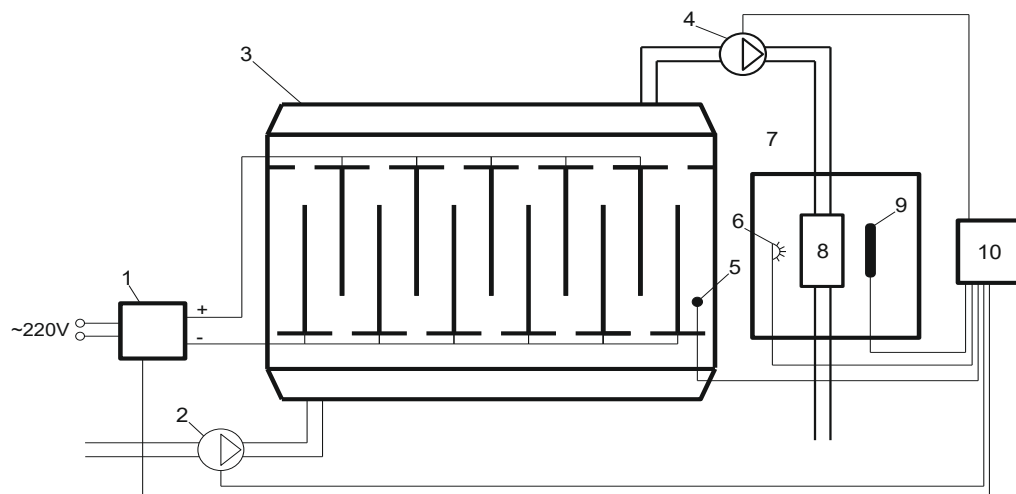


Рис. 7. Структура лабораторної установки автоматизованої системи електрохімічного отримання коагулянту на основі фотокolorиметричного аналізу

Відповідно до розробленої структури лабораторної установки, електрокоагулятор (3) є проточного типу і являє собою ємність зі діелектричного матеріалу з металевими пластинами всередині, по чергової різної полярності, що утворюють катода та анода. Живлення електрокоагулятора забезпечується лабораторним блоком живлення (1). Вода подається за допомогою насоса (2), рівномірно розподіляється між камерами коагулятора та відводиться за допомогою насоса (4) до вимірювальної комірки (7). При цьому температура досліджуваного середовища контролюється за допомогою електронного термометра (5), що дублюється з лабораторним ртутним. Вимірювальна комірка складається із проточної прозорої вимірювальної ємності (8), джерела світла (6) та чутливого елемента (9). Вимірювальна інформація, а також сигнали управління комутують у блоці управління та реєстрації (10).

Розроблена лабораторна установка дозволила провести експериментальні дослідження для перевірки адекватності побудованої математичної моделі, а також отримати додаткові дані щодо зміни забарвлення води від концентрації заліза. Згідно плану експерименту, дослідження тривали 60 хвилин, при цьому кожні 6 хвилин здійснювалася фіксація показників сили струму живлення коагулятора, температура та інтенсивність складової кольору червоного, зеленого та синього світла. Таким чином було відібрано 10 проб розчину заліза у воді для лабораторного визначення концентрації стандартизованими методами.

В таблиці 1 наведені результати експериментального дослідження процесу, а саме: визначення концентрації загального та трьох валентного заліза, сили струму та колірності речовини в різні моменти часу та зі зміною напруги.

Таблиця 1

Результати експериментального дослідження

Номер проби	Час, хв	Напруга, В	Сила струму, А	Колірність			Температура, °С	Концентрація, мг/дм ³	
				R	G	B		Загальне залізо	Fe ³⁺
1	6	5	0,8	204	207	200	20	0,8	0,33
2	12	5	0,85	214	215	193	22	1,1	0,4
3	18	6	1,3	211	194	75	23	3,7	2,9
4	24	6	1,3	220	173	54	23	4,5	3,1
5	30	7	1,65	210	155	49	23	6,3	5,4
6	36	7	1,65	215	147	41	23	6,9	5,8
7	42	8	1,9	193	116	38	23	9,1	7,1
8	48	8	1,9	189	111	33	23	9,6	7,6
9	54	9	2,05	188	100	27	23	11,8	8,9
10	60	9	2,1	178	74	11	23	12,6	9,6

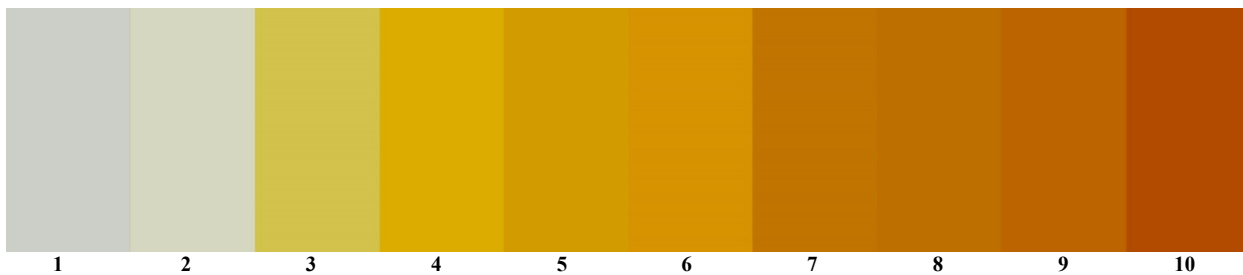


Рис. 8. Зміна кольору речовини при зміні напруги

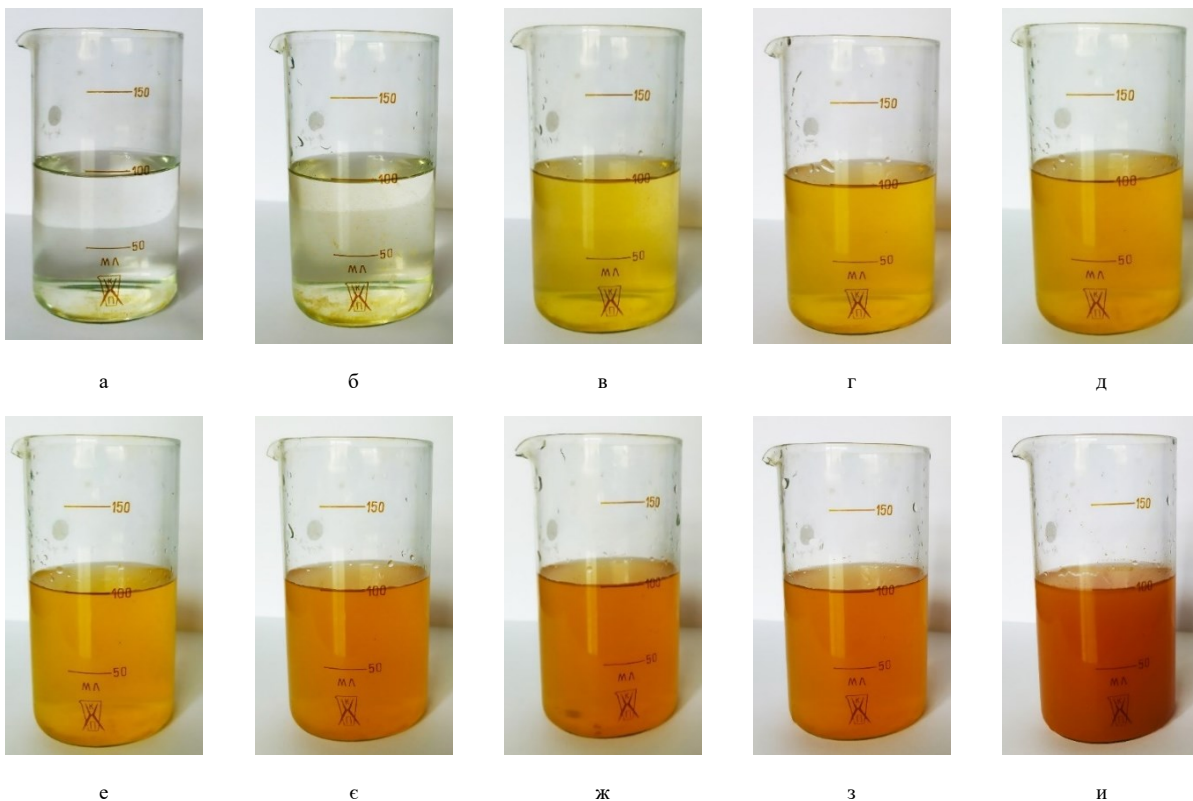


Рис. 9. Колір води RGB при змінній концентрації та часу дослідження :

- а) RGB (204;207;200), $c=0,8$ мг/л, $t=6$ хв; б) RGB (214;215;193), $c=1,1$ мг/л, $t=12$ хв;
в) RGB (211;194;75), $c=3,7$ мг/л, $t=18$ хв; г) RGB (220;173;54), $c=4,5$ мг/л, $t=24$ хв;
д) RGB (210;155;49), $c=6,3$ мг/л, $t=30$ хв; е) RGB (215;147;41), $c=6,9$ мг/л, $t=36$ хв;
є) RGB (193;116;38), $c=9,1$ мг/л, $t=42$ хв; ж) RGB (189;111;33), $c=9,6$ мг/л, $t=48$ хв;
з) RGB (188;100;27), $c=11,8$ мг/л, $t=54$ хв; и) RGB (178;74;11), $c=12,6$ мг/л, $t=60$ хв;

Експериментальне дослідження проводилося протягом 60 хв, з результатів експерименту бачимо, що при збільшенні напруги від 5 В до 9 В – збільшується сила струму від 0.8 А до 2.1 А відповідно результатам таблиці 1 та змінюється колірність вихідної речовини згідно Рис. 8. Тобто при найменшій напрузі можемо спостерігати найсвітлішу та майже прозору воду, а при найвищому показнику напруги мутну і руду воду.

В ході дослідження було відібрано 10 проб, що продемонстровані на рис. 9 та на базі яких проведено на приладі КФК2-МП визначення загального заліза і трьох валентного Fe^{3+} .

В ході опрацювання результатів побудовано графічні залежності RGB-складових кольору води та відповідної концентрації загального заліза (рис. 10) і Fe^{3+} у воді (рис. 11).

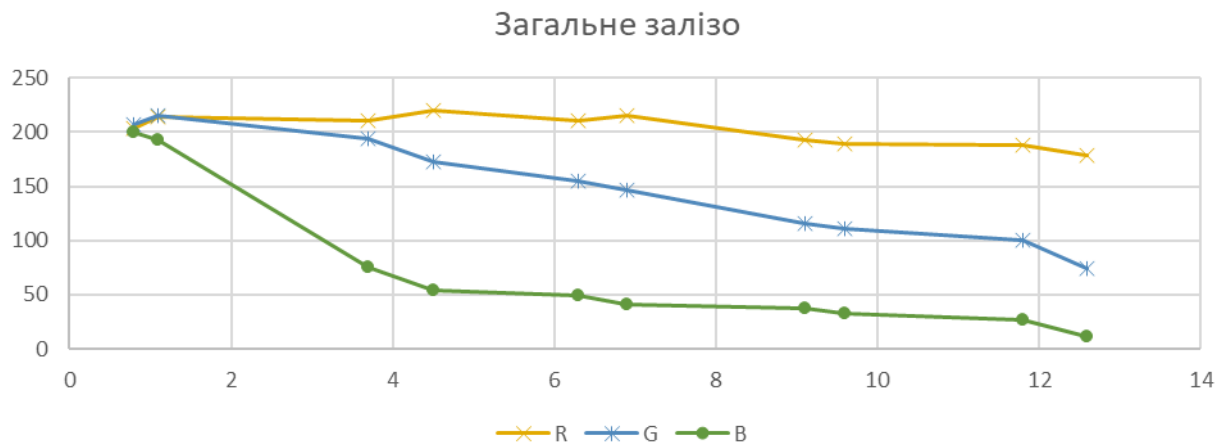


Рис. 10. Залежність концентрації загального заліза від RGB-складових кольору води

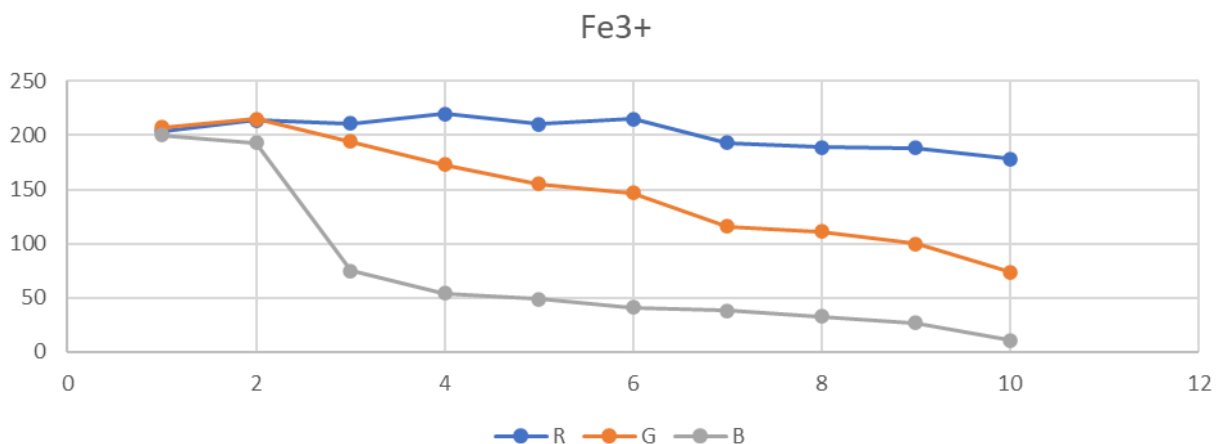


Рис. 11. Залежність концентрації Fe^{3+} від RGB-складових кольору води

Аналізуючи графіки залежностей складових кольору від концентрації можна зробити висновок про стійкі кореляційні взаємозв'язки між цими параметрами. Таким чином, це дає можливість для розробки нових експрес-методів, в тому числі інтелектуальних, для оцінки концентрації заліза у воді в реальному режимі часу, без необхідності відбору проб, а також в подальшому інтегрувати такі методи у системи керування процесами електрокоагуляції.

Висновки. Узагальнено математичну модель отримання коагулянту, яка дозволяє визначити необхідні умови, а саме: кількість пластин, розміри реактора, величина прикладеної напруги і т.д. для отримання заданої концентрації іонів заліза. За допомогою *m*-функції *pdepe* програмного середовища *Matlab* проведено моделювання системи отримання коагулянту. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації іонів заліза, температури водного середовища при різній величині струму між катодом і анодом. Розроблено лабораторну установку визначення залізовмісного коагулянту на основі фотоколориметричного аналізу, що складається з проточної непрозорої комірки через яку з сталою витратою пропускається досліджувана рідина, а також блоком оброблення та збереження інформації, що дозволяє знизити участь людини в процесі вимірювань і забезпечити безперервність процесу вимірювань через відсутність потреби у відборі проби досліджуваного матеріалу, а також зменшити трудомісткість процесу вимірювань.

Reference

1. Posavčić H., Halkijević I., Vuković Ž. Application of electrocoagulation for water conditioning. *Environmental Engineering*, 2019, 6(2) pp. 59-70. doi: 10.37023/ee.6.2.3.
2. Yasri N., Hu J., Kibria Md. G., Roberts P. L. E. Electrocoagulation Separation Processes. *Multidisciplinary Advances in Efficient Separation Processes*, 2020, Chapter 6, pp. 167-203. doi:10.1021/bk-2020-1348.ch006.
3. Forero G., Hernández-Lara R., Rojas O. Development of an electrocoagulation equipment for wall paint wastewater treatment. *Ingeniería y Competitividad*, 2020, 22(2). pp. 1-10. doi: 10.25100/iyv.v22i2.9474.
4. Rahman A. N., Kumar N. K. M. F., Gilan U. J., Jihed E. E., Philip A., Linus A. A., Shahin N. D., Ismail V. Kinetic Study & Statistical Modelling of Sarawak Peat Water Electrocoagulation System using Copper and Aluminium Electrodes. *Journal of Applied Science & Process Engineering*, 2020, 7(1). pp. 439 - 456. doi: 10.33736/jaspe.2195.2020.
5. Saeed H. Al-Barakat, Matloub F. K., Ajjam S. Kath., Tahseen A. Al-Hattab. Modeling and Simulation of Wastewater Electrocoagulation Reactor. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020. Volume 871. doi: 10.1088/1757-899X/871/1/012002.
6. Koyuncu S., Ariman S. Domestic wastewater treatment by real-scale electrocoagulation process. *Water Sci Technol*. 2020, 81 (4). pp. 656–667. doi: 10.2166/wst.2020.128.
7. Yasri N., Arumugam A., Kalpana M., Shu T., Fuladpanjeh B., Oldenburg T., Trifkovic M., Mayer B., Roberts P.L. E. Electrocoagulation for the treatment of Produced Water. *University of Calgary. Alberta Innovates*, 2017.
8. Govindan K., Arumugam A., Kalpana M., Rangarajanb M., Shankare P., Jang A. Electrocoagulants characteristics and application of electrocoagulation for micropollutant removal and transformation mechanism. 2019. DOI: 10.1021/acsami.9b16559.
9. Bomba A., Safonyk A. Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium. *Zeszyty Naukowe WS*, 2013. Vol. 12, No 1, pp. 21–29.
10. Bomba A., Klymiuk Yu., Prysiazhniuk I., Prysiazhniuk O., Safonyk A. Mathematical Modeling of Wastewater Treatment from Multicomponent Pollution by Using Microporous Particles. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1773, pp. 1–11.
11. Kaur R., Amit A. Treatment of waste water through electrocoagulation. *Pollution Research*, 2018, Vol. 37, Issue 2, pp. 394–403.
12. Masawat P., Harfield A., Srihirun N., Namwong A. Green Determination of Total Iron in Water by Digital Image Colorimetry. *Analytical Letters*, 2016, 50(1), pp. 173–185. doi: 10.1080/00032719.2016.1174869.
13. Sreenivasareddy A. Determination of Iron Content in Water. *Governors State University OPUS Open Portal to University Scholarship*, 2017.
14. Barros J. A. V. A., Moreira F., Santos G., Wisniewski C., Luccas P. O. Digital Image Analysis for the Colorimetric Determination of Aluminum, Total Iron, Nitrite and Soluble Phosphorus in Waters. *Analytical Letters*, 2016, pp. 414-430. doi: 10.1080/00032719.2016.1182542.
15. Firdaus M., Alwib W., Trinoveldib F., Rahayuc I., Rahmidard L., Warsitoa K. Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry. *Procedia Environmental Sciences*, 2014, Vol 20, pp. 298 – 304. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.037.
16. Luka G. S., Nowak E., Kawchuk J., Hoorfar M., Najjaran H. Portable device for the detection of colorimetric assays, 2017. doi: 10.1098/rsos.171025.

УДК 658

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-15

ОЛІЙНИК Н. Ю.

Харківський торговельно-економічний інститут
Київського національного торговельно-економічного університету

МОКРИЦЬКА Г. М.

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З.Гжицького

РОЩІН І. Г.

Університет митної справи та фінансів

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СУЧАСНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ

Наукова стаття являє собою оригінальне дослідження особливостей введення, а також актуальних тенденцій практичного застосування інформаційних технологій в структурі сучасного менеджменту. Використання інформаційних технологій в управлінській роботі є важливим інструментом підвищення конкурентоспроможності як окремих суб'єктів господарювання, так і держави загалом, яка в умовах сьогодення є мультикомпонентним складним середовищем, що побудоване на засадах ефективної взаємодії органів публічного управління та громадськості. Таким чином, в умовах динамічного розвитку різних сфер життєдіяльності, оптимізація взаємовідносин суб'єктів економічного середовища неможлива без оновлення інструментів організації їх співпраці. Це підтверджує необхідність трансформації підходів управління, інформаційні технології в структурі яких мають займати провідне значення.

Ключові слова: інформаційні технології, інформація, ефективність, управління підприємством, управлінські рішення, публічний менеджмент.

N. OLINYK

Kharkiv Institute of Trade and Economics of Kiev National University of Trade and Economics

H. MOKRYTSKA

Stepan Gzhyskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv

I. ROSHCHIN

University of Customs and Finance

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN MODERN MANAGEMENT

The article is devoted to the analysis of the current trends of applications of information technologies in modern management. The dissemination and use of information technologies in coordination and management activities is an important tool to assist in effectively of corporate governance and national governance. So, in today's rapidly changing world, state is a multicomponent system, which causes and perpetuates constant relationships, such as interactions between the public and public authorities through different tools for the exchange of information. So, modern information technologies are an essential tool for the efficient management of the relations between those involved in economic activity.

The concept of information technologies and communication, development trends and its role in the construction of modern management was highlighted. The prospects for use of information technologies in addressing improvement modern management, improving and strengthening of communication process between the governing and the governed, between the Government and the citizen was described in the article by authors.

In this scientific paper information technologies are considered as the centerpiece for optimizing and coordinating management of financial, human resources at the enterprise level or national level, which depends on the level of managerial decision-making. Furthermore, use of information systems and modern technologies in the field of management contributes to increasing the efficiency of production and economic activity of the enterprise and the national economy as a whole due to more efficient collection and more rational mechanism of processing and systematization of economic information, forming an optimal development strategy in a competitive rapidly changing market environment. Also, authors have described the role of math modeling as one of the perspective way of using information technologies in the context of improving the management effectiveness. Comparison, methods of abstraction, analysis and generalization are the research methods which were used in the article.

It is defined, that applications of information technologies in modern management has a positive impact on the implementation of the management solutions, reducing the time of response to external changes, increasing the level of productivity, timely obtaining more rational options for solving management problems. This imposes a cumulative effect for domestic enterprise development and sustainable economic and social development of Ukraine.

Key words: information technologies, information, efficiency, business management, management decisions, public management.

Постановка проблеми. Формування інформаційного простору, а також значна цифровізація суспільства, беззаперечно, веде до фундаментальних змін у структурі та підходах реалізації управлінської роботи. Сьогодні менеджмент являє собою не просто сукупність інструментів впливу на певні процеси, що виникають у виробничо-господарській, соціально-економічній, політичній чи інших сферах життєдіяльності. Сучасний менеджмент варто досліджувати як симбіоз відносин суб'єктів глобального чи національного економічного простору, що виникають в процесі планування, розробки та впровадження управлінських

рішень, ефективність організації яких безпосередньо залежить від рівня застосування інновацій, а також інформаційних та комунікаційних технологій.

Окрім того, інтенсивні трансформаційні тенденції, спричинені пандемією, загострення конкуренції та мінливість соціально-економічного розвитку країни актуалізують питання вдосконалення підходів управління процесами на різних рівнях господарювання. В таких умовах інформаційні технології залишаються універсальним інструментом збереження комунікації, а також раціоналізації використання інформаційних ресурсів, які в умовах глобалізованого економічного простору виступають потужним засобом забезпечення високого рівня конкурентоспроможності як підприємств, так і держави загалом.

Застосування ІКТ в сучасному менеджменті забезпечує оптимізацію процесів отримання та обробки інформації, що підвищує якість та цінність такої інформації. Враховуючи те, що нагромаджені дані є частиною ресурсного потенціалу держави, доцільно приділяти більше уваги впровадженню новітніх інформаційних технологій, а також інновацій в структуру вітчизняних управлінських концепцій. Таким чином, використання ІКТ створює передумови для стабілізації діяльності суб'єктів економічного простору, що забезпечує високий рівень результативності менеджменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням застосування новітніх інформаційних технологій в сучасному корпоративному та публічному менеджменті, а також аспектам щодо оптимізації державного менеджменту шляхом активного впровадження ІКТ в управлінські процеси присвячено праці багатьох науковців. Аналіз теоретико-методологічних аспектів здійснення корпоративного менеджменту шляхом використання інформаційних технологій було проведено Ж. М. Жигалкевич [1]. У своїх роботах науковець охарактеризувала концепцію CRM, визначила позитивні та негативні впливи впровадження BPR-і ERP-технологій, а також дослідили сутність SCM-технології з прикладами сфер її застосування. Г. Б. Пчелянська та К. О. Васюковська [2] дослідили роль інформаційних технологій в управлінні суб'єктами господарювання, значили основні переваги і недоліки використання ІТ в менеджменті, охарактеризували сучасну технологію обробки інформації HANA, яка дозволяє оптимізувати роботу із великими масивами даних. Г. М. Пурій [3] в своїй роботі обґрунтував необхідність застосування інформаційної системи як потужного інструмента забезпечення конкурентоспроможності сучасного підприємства; також науковець визначив роль інформації в умовах значної цифровізації суспільного життя. Вплив цифрових технологій на різні аспекти управління діяльністю підприємств та можливості їх використання для підвищення конкурентоспроможності господарюючих суб'єктів в Україні досліджено О. В. Іванюк та Ю. Яшук [4].

Аналіз динаміки впливу інформаційних технологій на трансформацію публічного управління, а також передумов реформування публічного управління, основних проблем та перешкод впровадження системи електронного урядування було здійснено О. В. Іванюк, В. А. Довженко та І. В. Кравець [5].

Існує певна залежність між розвитком інформаційних технологій, математичних методів моделювання процесів, а також управлінням діяльністю суб'єктів економічного середовища. Зокрема, аналіз математичних методів і моделей як одних із найбільш перспективних засобів забезпечення високотехнологічного стратегічного аналізу, планування та управління діяльністю підприємства було охарактеризовано Н. Б. Бідник [6], Г. С. Трофименко, А. А. Титенко [7], Л. П. Гусак [8], Н. К. Дьяченко [9].

Серед зарубіжних вчених значні дослідження щодо використання інформаційних технологій в управління було здійснено J. D. Wisner [10]; в монографії науковця значну увагу приділено особливостям застосування SCM-технології в корпоративному менеджменті, автором проаналізовано сучасні тенденції побудови корпоративної стратегії шляхом використання ІКТ, проектування послуг, управління запасами, сукупного планування, прогнозування, управління якістю, інтеграційних процесів по ланцюгу поставок тощо. Закономірності впровадження інформаційних технологій в структуру управління запасами підприємства, інноваційний підхід до вирішення проблеми реалізації управлінських рішень шляхом застосування нових цифрових технологій було окреслено S. Müller, J. Huber, M. Fleischmann, H. Stuckenschmidt [11]. Особливості впорядкування інформації шляхом використання ІКТ, а також організація корпоративного менеджменту на підприємствах, діяльність яких є сезонною визначено в праці J. Schlapp та M. Fleischmann [12].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Праці наведених дослідників всебічно характеризують поточні тенденції застосування ІКТ та методів математичного моделювання в сучасному менеджменті. Проте, мінливість бізнес-середовища, зниження фінансової стабільності суб'єктів економічного простору, а також погіршення показників соціально-економічного розвитку України стали передумовами розробки нових концепцій та інструментів реалізації менеджменту, практика використання яких є недостатньо адаптованою до реалій вітчизняного бізнес-сектору, а також змін, спричинених реформуванням підходів здійснення публічного управління, що підтверджує важливість проведення досліджень окресленої проблематики.

Формулювання цілей статті. Метою написання наукової статті є аналіз особливостей введення, а також актуальних тенденцій практичного застосування інформаційних технологій в структурі сучасного менеджменту. Для досягнення поставленої мети в процесі дослідження було сформовано та вирішено важливі наукові та практичні завдання, зокрема:

- охарактеризувати сутність інформаційних технологій шляхом детермінування ключових ознак та притаманних для категорії рис;
- визначити роль та переваги використання інформаційних технологій в структурі управлінської діяльності на рівні окремих підприємств, а також на рівні держави загалом;
- окреслити тенденції використання інформаційних технологій в комбінації із методами математичного моделювання в умовах оптимізації управління діяльністю вітчизняних суб'єктів господарювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. В умовах стимулювання сталого розвитку України особливе значення мають інструменти забезпечення менеджменту на різних рівнях взаємодії учасників економічного простору – зокрема, взаємодії державних органів влади в частині забезпечення реалізації управлінських рішень загальнонаціонального значення, взаємодії корпоративних менеджерів та виконавців управлінських задач в контексті реалізації стратегії діяльності окремих суб'єктів господарювання, а також взаємодії учасників економічного середовища, тобто органів публічної влади, керівних органів вітчизняних підприємств та громадськості. Визначено, що універсальним інструментом систематизації управлінських та інших функціональних процесів, що виникають між вище окресленими суб'єктами є інформаційні технології (далі – ІТ), застосування яких в менеджменті має на меті:

- по-перше, вдосконалення державного управління, відносин між державою і громадянами, становлення електронних форм взаємодії між органами державної влади та органами місцевого самоврядування, а також фізичними та юридичними особами;
- по-друге, захист інформаційних прав суб'єктів та об'єктів – учасників системи сучасного управління;
- по-третє, покращення стану інформаційної безпеки в умовах поширення використання новітніх ІКТ як інструментів організації управління.

Застосування інформаційно-комунікаційних технологій (далі – ІКТ) в сучасному менеджменті забезпечується положеннями інформаційної політики, яка визначає, що інформаційні технології не є універсальним засобом оптимізації управлінської роботи; інформатизація та цифровізація менеджменту також супроводжується формуванням відповідних умов, зокрема розробкою медіа-права, яке виступає базисом та регуляторним інструментом застосування ІКТ в різних сферах життєдіяльності суспільства, інформаційною політикою розвитку та захисту національно-ідентифікованого Інтернет-середовища, а також відповідною медіа-освітою для всіх без винятку учасників корпоративного чи державного управління. Отже, впровадження ІКТ у менеджмент є неминучим етапом в умовах формування сучасного інформаційного суспільства.

Таким чином, використання інформаційних технологій у менеджменті доцільно розглядати як симбіоз наукових, технологічних, інженерних дисциплін, що вивчають методи ефективного управління працею людей, обробкою й зберіганням інформації; раціональна моделі управління має гармонійно поєднувати використання обчислювальної техніки та методів організації й взаємодії з людьми й виробничим устаткуванням, а також пов'язані із усім цим соціальні, економічні й культурні проблеми. Основними принципами застосування інформаційних технологій є інтегрованість, гнучкість та інформативність процесів [13, с. 7–8]. Інформаційних технологій в сучасному менеджменті є інструментом, який підтримує взаємозв'язок між процесами публічного управління в державі та створенням інформаційного суспільства, що є необхідним кроком в умовах глобалізації (рис. 1).

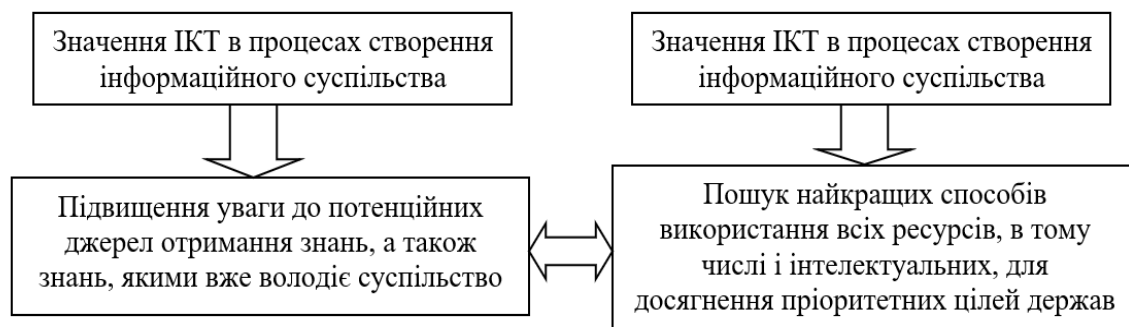


Рис. 1. ІТ в контексті підтримки взаємодії між процесами створення інформаційного суспільства та реалізацією публічного управління

Джерело: складено автором за даними [5].

Державний менеджмент в інформаційному суспільстві – це процеси розробки та пропозиції якісних послуг, а також забезпечення результативної роботи державних установ через використання інтелектуального капіталу, сучасних систем менеджменту та інформаційних технологій. Отже, перехід до інформаційного суспільства неможливий без використання ІКТ.

Стратегія і тактика впровадження інформаційних технологій у сучасний менеджмент передбачає реалізацію сукупності взаємопов'язаних завдань:

- формування єдиного інформаційного простору держави і його інтеграція у внутрішнє і зовнішнє середовище;
- формування і розвиток інформаційної інфраструктури держави;
- розробка інформаційних продуктів і надання послуг;
- формування інформаційних ресурсів за різними напрямками і на різних рівнях;
- розвиток засобів масової інформації;
- застосування можливостей інформаційних технологій для розвитку нових форм підприємництва, освіти, науки, соціальної сфери;
- захист інтелектуальної власності в інформаційних мережах;
- створення системи регулювання і контролю за застосуванням і використанням інформаційних технологій та захист особистості, суспільства, держави від неякісної, неправдивої інформації [14, с. 38].

В умовах глобальної цифровізації інформаційні технології є основним засобом модернізації процесів публічного управління, яка має на меті підвищення результативності менеджменту, доступності до інформації щодо діяльності органів державної і муніципальної влади. Соціально-економічні тенденції розвитку України свідчать про мінливість, а також наявність характерних ознак кризи. Проте, в частині організаційного забезпечення процесів застосування ІТ в управлінні є позитивні аспекти. Зокрема, вітчизняний інформаційний простір має необхідні передумови для формування інформаційної інфраструктури і широкого застосування ІКТ на всіх рівнях управління. З метою систематизації ці передумови можна умовно розділити на чотири групи – політичні, нормативно-правові, організаційні, техніко-технологічні, фінансові (табл. 1).

Таблиця 1

Передумови широкого впровадження ІТ в публічний менеджмент

Політичні передумови	1. Підтримка проекту електронного урядування керівництвом держави; 2. Демократична та правова держава, розвинуте громадянське суспільство
Нормативно-правові передумови	1. Наявність необхідної та достатньої системи нормативно-правових документів та їх адаптованість до стандартів ЄС
Техніко-технологічні передумови	1. Наявність діючої інформаційної інфраструктури; 2. Підключення до Інтернету більше, ніж 60% громадян країни
Фінансові передумови	1. Достатність ресурсів для впровадження і реалізації проектів електронного урядування

Джерело: складено автором за даними [5]

Отже, варто зауважити, що значними темпами зростає рівень телекомунікаційного забезпечення та цифрової грамотності населення України. В 2019 році 71,0 % дорослого населення користувалися інтернетом, що на 8,0 % більше, ніж за попередній звітний період. Детальна характеристика динаміки проникнення Інтернету у розрізі типів населених пунктів зображена на рис. 2.

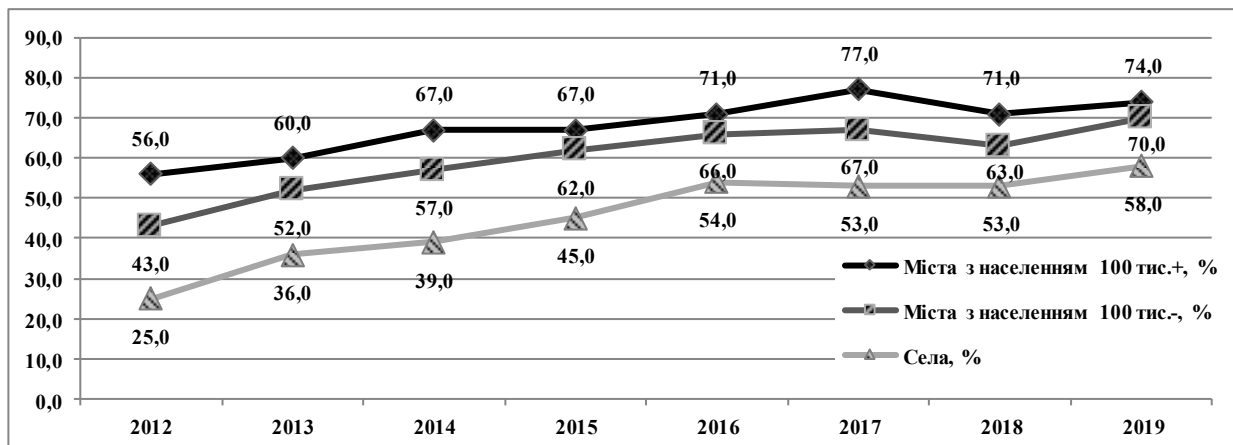


Рис. 2. Динаміка проникнення Інтернету у розрізі типів населених пунктів України, 2012–2019 рр. (%)

Джерело: складено автором за даними [15]

Отже, застосування інформаційних технологій в публічному управлінні стає все зручнішим, оскільки динаміка розвитку інформаційного суспільства в Україні, рівень розвитку інформаційної інфраструктури і, відповідно, рівень цифрової грамотності та обізнаності населення стрімко ростуть. На основі таких тверджень можна говорити про беззаперечні переваги використання ІТ в управлінні (рис. 3):

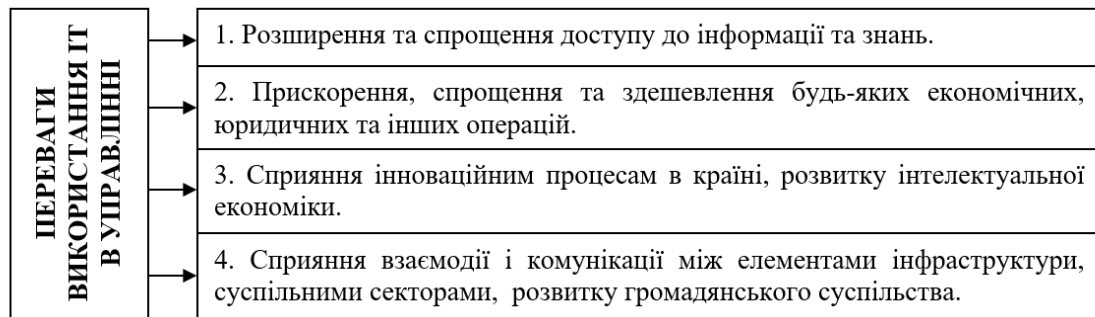


Рис. 3. Переваги використання ІКТ в сучасному менеджменті

Джерело: складено автором за даними [5]

Використання інформаційних технологій на рівні корпоративного менеджменту є не менш важливим на шляху створення високотехнологічного та високоефективного господарського сектору України. Основними причинами, які зумовлюють необхідність застосування сучасних інформаційних систем і технологій в управлінні діяльністю господарюючих суб'єктів є:

- погіршення економічних показників його діяльності;
- використання застарілих інформаційних технологій, що не задовольняють менеджмент підприємства;
- відсутність інформаційних технологій для обліку та аналізу [16, с. 272].

Актуальні тенденції ринку програмного забезпечення управління діяльністю підприємств свідчать про наявність безлічі автоматизованих інформаційних систем. Найвідомішими зарубіжними виробниками корпоративних інформаційних систем є SAP, IBM, Oracle, PeopleSoft, REAL Application, Hewlett-Packard та інші. До широко застосовуваних корпоративних інформаційних систем варто віднести Scala, BAAN, «Галактика», Oracle Applications, System Aurora (Business/400), Infor SyteLine ERP, Microsoft Dynamics AX «Microsoft Dynamics NAV, «Компас», «АТОР», Business Control, Global ERP, BPR, MRP I / MRP II, CRM, SCM та інші [3; 17, с. 56]. Отже, якщо господарюючий суб'єкт має на меті оптимізувати управління процесами взаємодії із клієнтами, зокрема збільшити якість обслуговування клієнтів, то для даного випадку була розроблена концепція управління взаємовідносинами з клієнтами – Customer Relationship Management (далі – CRM), основним завданням якої є забезпечення автоматизації процесів збору даних про покупців, а також підтримка перманентного зв'язку із покупцями [1].

Наступною концепцією сучасного менеджмента є Supply Chain Management (далі – SCM); це концепція управління бізнесом як єдиним ланцюжком взаємозалежних об'єктів, матеріальних та інформаційних потоків підприємства, його постачальників, дистриб'юторів і клієнтів, виділяючи в свою чергу шість основних областей, на яких зосереджено управління ланцюгами поставок: виробництво, постачання, місце розташування, запаси, транспортування і інформація. Тобто, SCM охоплює весь цикл закупівлі сировини, виробництва і розповсюдження товару/послуги.

Екстремальні умови господарювання, спричинених пандемією Covid-19, посприяли трансформації концепції SCM, виникли нові стимули до раціоналізації управління господарськими, виробничими та збутовими процесами. В умовах глобальної нестабільності під час пандемії спостерігається безпрецедентна трансформація попиту на різні продукти; активного розвитку отримали електронні послуги, зокрема оформлення та доставки замовлень [18]. Окреслені тенденції змінюють підходи управління бізнесом та його окремими складовими. Зокрема, нижче наведено кілька прикладів альтернативних управлінських рішень компаній та урядів, прийнятих під впливом зміни кон'юнктури ринку в умовах пандемії:

- реалізація типових, традиційних управлінських заходів в умовах ринкової нестабільності, зокрема створення резервів запасів для покриття невизначеного постачання;
- співпраця з метою створення додаткових продуктів та спільного використання ресурсів. В умовах типового конкурентного середовища господарюючі суб'єкти не використовують інструменти перерозподілу чи спільного використання ресурсів ланцюга поставок. Проте, в екстремальних умовах пандемії спільне використання ресурсного потенціалу забезпечує більшу ефективність для всіх учасників ринку;
- зміна підходів реалізації збутової політики підприємства, створення тимчасових збутових каналів;
- фінансове втручання уряду. Учасники ланцюгів поставок шукають додаткові джерела отримання прибутку, тому уряди багатьох країн надають прямі субсидії або податкові пільги, щоб стимулювати ці компанії до максимізації соціального добробуту;
- використання онлайн-платформ для узгодження попиту та пропозицій;
- використання онлайн-платформ для співпраці учасників ланцюгів поставок;
- використання інформаційних технологій з метою забезпечення прозорості діяльності учасників ланцюгів поставок, а також управління їх взаємодією [19].

Окреслені тенденції відображають зміну сучасного менеджменту під тиском соціально-економічної невизначеності, підтверджують необхідність використання ІТ як головного інструмента забезпечення управління діяльністю підприємств в кризових умовах. В управлінні бізнес-процесами поширено використання і таких технологій, як Business Process Reengineering (BPR) і Enterprise Resource Planning (ERP). Ці продукти сприяють координації інновацій, мінімізації ризиків, підвищенню масштабованості та гнучкості, зниженню витрат [20], підвищенню економічної безпеки господарюючого суб'єкта.

Узагальнюючи практику використання окреслених систем можна визначити наступне:

ERP-система виконує функції бізнес-планування і прогнозування; планування продажу та виготовлення продукції; планування проектів і програм; управління попитом; управління витратами;

BPR-системи – це аналітична система, що дозволяє менеджерам мати персоналізований погляд на стан бізнесу (тобто, вносити персональні корегування у процеси управління) [20; 21, с. 23].

Підвищення результативності управління виробничими та господарськими процесами також відбувається завдяки застосуванню MIS- і BI-технологій. Їх практичне використання спричиняє досягнення синергетичного ефекту; автоматизацію та узгодження дії всіх відділів підприємства; успішну реалізацію стратегічних програм; підвищення конкурентних переваг господарюючого суб'єкта [22]. Рівень впровадження інформаційних технологій у корпоративний менеджмент впливає на перспективи застосування математичного моделювання як на пряму планування і управління господарською і виробничо-збутовою діяльністю підприємств.

Таблиця 2

Методи економіко-математичного моделювання в управлінні діяльністю підприємств

<i>Адаптивні методи прогнозу</i>	
Сутність	Під час надходження нової інформації до параметрів моделі вносяться відповідні корективи, в результаті чого модель адаптується до нових умов
Сфера застосування	Прогноз споживання продукції, що мають сезонний попит; короткострокове прогнозування цін на споживчі товари.
<i>Дискримінаційний аналіз</i>	
Сутність	Призначений для розв'язання завдань розпізнавання образів, під час прийняття рішень щодо дискримінації змінних
Сфера застосування	Оцінка впливу індивідуальних характеристик під час сегментування споживачів
<i>Факторний аналіз</i>	
Сутність	Дозволяє відновити прогнозовану структуру, що знаходиться в основі спостережних даних з метою їх описання у стислому та інтерпретованому вигляді
Сфера застосування	Визначення характеристик торгової марки, що впливають на вибір споживачів; ідентифікація латентних змінних з метою групування споживачів; пояснення відмінностей між лояльними/нелояльними споживачами
<i>Кластерний аналіз</i>	
Сутність	Передбачає розбиття сукупності об'єктів, що аналізуються, на певне число однорідних класів в умовах відсутності вибірок.
Сфера застосування	Визначення конкурентоспроможної продукції в межах певного ринку; вибір об'єктів порівнянь для перевірки маркетингових стратегій; зниження розмірності даних
<i>Дисперсійний аналіз</i>	
Сутність	Полягає у розкладанні загальної варіації ознаки на складові частини, що визначаються на підставі чинників, які впливають на варіацію, що дає змогу оцінити внесок кожної компоненти на змінність значень ознаки
Сфера застосування	Оцінка ступеня реклами та цін на продаж продукції даної торгової марки; визначення обізнаності споживачів про неї; з'ясування розбіжностей оцінок респондентів щодо марки
<i>Методи теорії ігор</i>	
Сутність	Методи, які визначають рівень можливих втрат за умови реалізації одного з альтернативних рішень
Сфера застосування	Моделювання обміну товарами у мовах невизначеності та ризику; розробка та ухвалення маркетингової стратегії в умовах невизначеності та ризику
<i>Методи оцінки та аналізу ризиків</i>	
Сутність	Методи, які визначають рівень можливих втрат при реалізації управлінського рішення
Сфера застосування	Вибір стратегії виходу певної продукції на ринок, при якій ризик буде мінімальним; вибір ринку збуту; вибір постачальників
<i>Метод нечіткого логічного висновку</i>	
Сутність	Орієнтований на моделювання об'єктів, які мають чинники невизначеності. Використовується під час аналізу складних систем
Сфера застосування	Оцінка ринку; вибір товару; прогнозування збуту продукції; розробка автоматизованої системи підтримки прийняття маркетингових рішень

Джерело: складено автором за даними [9, с. 124]

Використання математичних методів та моделей в комбінації із ІКТ сприяє раціоналізації процесів стратегічного та тактичного планування, аналітичного планування різних соціально-економічних процесів, прогнозування, а також наукового аналізу [9, с. 124].

Основні економіко-математичні методи моделювання процесів управління діяльністю підприємства наведені у таблиці 2.

Отже, на сучасному етапі розвитку України важливою умовою стимулювання позитивної динаміки діяльності підприємств, а також результативності публічного управління є оптимальна комбінація важелів впливу на суспільні процеси, зокрема шляхом використання інформаційних технологій та методів математичного моделювання – сучасних інструментів забезпечення розвитку кожного із учасників загальнонаціонального економічного простору.

Висновки. В ході аналізу було визначено, що в умовах глобальної цифровізації застосування ІКТ є надзвичайно важливим, оскільки вони забезпечують оптимізацію процесів управління виробничо-господарськими, людськими і фінансовими ресурсами, а також потенціалом підприємства або ж держави, загалом; ІТ дозволяють підтримувати високий рівень результативності як публічного, так і корпоративного менеджменту.

Окрім того, інформаційні технології гармонійно доповнюють інструментарій математичних методів, які є високоефективними підходами моделювання процесів виробничо-господарської та збутової діяльності.

Отже, завдяки застосуванню інформаційних технологій досягається максимізація ефективності управлінських рішень, що є необхідним для оптимального менеджменту, планування та пошуку резервів підвищення ефективності функціонування вітчизняних підприємств та національної економіки.

References

1. Onopko A.S., Zhygalkevych Zh.M. (2017), "Application of information technologies in enterprise management", Zbirnyk naukovykh prac' «Aktual'ni problemy ekonomiky ta upravlinnja» (elektronne vydannja), vol. 11, available at: <http://ape.fmm.kpi.ua/article/view/102782> (Accessed 17 April 2021) [in Ukrainian].
2. Pcheljans'ka G.B., Vas'kovs'ka K.O., Pcheljans'kyj D.P. (2018), "The role of information technologies in the management of the enterprise", *Ekonomika harchovoi' promyslovosti*, T. 10, vol. 1/2018, pp. 71-75 [in Ukrainian].
3. Purij G. M. (2019), "Information systems and technologies in the management of the enterprise activity", *Efektivna ekonomika*, vol. 6. DOI: 10.32702/2307-2105-2019.6.5, available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7127> (Accessed 17 April 2021) [in Ukrainian].
4. Ivanjuk O. V., Jashhuk Ju. (2021), "The impact of digital technologies on the competitiveness of enterprises", *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal «Graal' nauky»*. vol. 1, pp. 83-87. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science> [in Ukrainian].
5. Ivaniuk, O. V., Dovzhenko, V. A., Kravets, I. V. (2018), "Perspectives of information technologies in the domestic public administration system", *Derzhavne upravlinnja: udoskonalennja ta rozvytok*, vol. 4, available at: <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=1220> (Accessed 17 April 2021) [in Ukrainian].
6. Bidnyk N.B. (2017), "Use of mathematical methods and models in management", *Naukovyj visnyk NLTU Ukraïny*, vol. 18.6, pp. 258-262 [in Ukrainian].
7. Trofymenko G. S., Tytenko A. A. (n.d.), "Methods of enterprise activity management", available at: <http://www.rusnauka.com>. (Accessed 17 April 2021) [in Ukrainian].
8. Gusak L.P., Teslja D. I. (2018), "Mathematical methods and models in enterprise management". *Matematychni metody, modeli ta informacijni tehnologii v upravlinni pidpryjemstvom: zb. mater. dop. uchasn. III stud. vuz. nauk. konf.* (pp. 50-52). Vinnycja: KNTU, VTEL. [in Ukrainian].
9. Diachenko N. K. (2020), "Features of the application of mathematical methods and models in the management of agrarian enterprises", *Ahrosvit*, vol. 9, pp. 121-126 [in Ukrainian].
10. Wisner, J. D. (2020), *Introduction to Operations Management: A Supply Chain Process Approach*. Cognella Academic Publishing.
11. Müller, S., Huber, J., Fleischmann, M., Stuckenschmidt, H. (2020), "Data-driven Inventory Management under Customer Substitution", available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3624026 (Accessed 17 April 2021).
12. Schlapp J. Fleischmann M. (2020), "Inventory Timing: How to Serve a Stochastic Season", available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3747789 (Accessed 17 April 2021).
13. Denisova O. O. (2004), *Informacijni systemy i tehnologii v jurydychnij dijal'nosti* [Information systems and technologies in legal activity], KNEU, Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
14. Yudin, O.K. and Bohush, V.M., (2004), *Informatsijna bezpeka derzhavy* [Information security of the state], Konsum, Kharkiv, Ukraine [in Ukrainian].
15. Internet penetration research in Ukraine in 2019, available at: https://inau.ua/sites/default/files/file/1910/dani_ustanovchyh_/doslidzhen_iii_kvartal_2019_roku.pdf (Accessed 17 April 2021) [in Ukrainian].
16. Yanchuk, T.V. (2016), "The value of the mechanism for the introduction of information technology in the economic activities of enterprises", *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*, vol. 4, pp. 269-276 [in Ukrainian].
17. Yurchuk, N.P. (2015), "Information systems in the management of enterprise activities", *Ahrosvit*, vol. 19, pp. 53-58. [in Ukrainian].
18. Terlep, S., and Gasparro, A. (2020), "Why are there still not enough paper towels?", *Wall Street Journal*. August 21, 2020, available at: <https://www.wsj.com/articles/why-arent-there-enough-paper-towels-11598020793> (Accessed 17 April 2021)
19. Sodhi, M. S., & Tang, C. S. (2020), "Supply Chain Management for Extreme Conditions: Research Opportunities", *Journal of Supply Chain Management*, DOI:10.1111/jscm.12255, available at: [sci-hub.se/10.1111/jscm.12255](https://doi.org/10.1111/jscm.12255) (Accessed 17 April 2021)

20. Laudon, K.C., Laudon, J.P. (1998), Management Information Systems. New Approaches to organization and technology. Ney Jersey: PrenticeHall, USA.
21. Balanovs'ka T. I., Gogulja O. P., Tuzhyk K. L. (2012), "Features of small business functioning in Ukraine", *Innovacijna ekonomika*, vol. 8 (34), pp. 22-31 [in Ukrainian].
22. Kajuchenko A.V. (2009), "Information technologies of enterprise management as a modern factor of enterprise competitiveness", *Kreatyvnaja ekonomika*, vol. 10 (34), pp. 71-76 [in Ukrainian].

УДК 621.396.6.019.3 : 620.172.21
DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-16

КОВТУН І. І., ГОРОШКО А. В., ПЕТРАЩУК С. А.
Хмельницький національний університет

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

У статті представлено математичне моделювання спрямоване на аналіз динамічного навантаження друкованих плат з метою усунення або зменшення динамічного напруження в конструкції друкованих плат до допустимого рівня та забезпечення її міцності та надійності при проектуванні друкованих плат, що зазнають активного впливу вібрації. Розроблено математичну модель, яка описує друковану плату, як окремо виділену коливальну систему представлену невагомою двохопорною балкою із розташованою по центру зосередженою масою, яка створює нерівномірність навантаження коливальної системи та здійснює відносний рух в неінерціальній системі відліку, що дозволяє визначати найбільші повні нормальні напруження та прогини, які відбуваються в небезпечному перерізі тіла друкованої плати для оцінки міцності та жорсткості. Математичне моделювання напружено-деформованого стану, вібраційного аналізу та розрахунків резонансних частот коливання виконано з використанням методів теоретичної механіки, опору матеріалів, прикладної теорії пружності та теорії коливань.

Ключові слова: друкована плата, вібрація, коливальна система, міцність, жорсткість, надійність.

I. KOVTUN, A. GOROSHKO, S. PETRASHCHUK
Khmelnytsky National University

STRESS AND STIFFNESS ESTIMATION FOR CIRCUIT CARDS ASSEMBLIES UNDER DYNAMIC LOADS

The paper represents mathematical modeling aimed at estimation of dynamic load response for circuit cards in order to eliminate it or reduce dynamic stress in the circuit card assemblies to the acceptable level and to provide their strength and reliability in conditions of the active vibration exposure. The mathematical model has been designed for dynamic strain and stress calculation in circuit cards, which represents cylindrical bending boards as bending the infinite number of beams-strips having rectangular section and considered a separated oscillatory mechanical system. The system is represented by weightless two-supported beam with concentrated mass in its middle point, which applies not uniform load to oscillatory system and performs the relative motion in non-inertial frame of reference. Thus the model estimates the maximal total normal stress and deflection in the dangerous section of the card applied for strength and stiffness assessment. Mathematical modeling strain and stress condition, vibration analysis and finding resonance frequencies are performed by using methods of theoretical mechanics, strength of materials, applied theory of elasticity and theory of oscillations. The strength and stiffness assessment has been recommended to perform by acceptable stress for the entire circuit card assembly, which is defined with respect to experimentally verified ultimate strength of the solder joint with safety factor that provides stress under ultimate elasticity of the solder. This approach has precised acceptable diapason of vibration by amplitude frequency response of maximal total normal stress and deflection estimated for circuit cards subjected to harmonic oscillation with constant amplitude.

Keywords: circuit card assembly, vibration, oscillatory system, strength, stiffness, reliability.

Постановка проблеми. Для розрахунку динамічних деформацій та напружень в друкованих платах розроблено математичну модель, яка описує друковану плату, як окремо виділену коливальну систему. На відміну від попередньої моделі, представленої в [1, 2], друкована плата представлена, вже не матеріальною точкою (масою), а тілом, в даному випадку призматичною балкою або пластиною.

Початковий вибір балки, як тіла, що моделює друковану плату, пояснюється тим, що циліндричний згин пластин можна розглядати як згин безлічі балок-смуг прямокутного перетину, подумки вирізаних із пластини в поперечному напрямку, та розрахунок таких балок-смуг проводиться звичайними методами опору матеріалів (побудова епіюр внутрішніх зусиль, визначення напружень і т.п.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Численні публікації, присвячені оцінці напружень [3] та контролю механічної міцності [4] для електронних пакетів, зокрема, для друкованих плат, що зазнають згинання та зсуву [5] та зазнають динамічних деформацій [6], динамічний аналіз [7] та надійність [8] з використанням конструкції зменшення вібрацій [9] та методів придушення вібрацій [10] свідчать про недостатню міцність та надійність сучасних електронних пакетів, досліджених у суворих умовах різноманітних впливів, включаючи механічні удари та вібрацію.

Постановка завдання. Математичне моделювання, представлене в цій роботі, спрямоване на аналіз динамічного навантаження друкованих плат з метою усунення або зменшення динамічного напруження в конструкції друкованих плат до допустимого рівня та забезпечення її міцності та надійності при проектуванні друкованих плат, що зазнають активного впливу вібрації.

Опис динамічного навантаження друкованої плати. На рис. 1 представлена схема динамічного навантаження балки із зосередженою масою m_z . Прийнято припущення, що масою самої балки можна знехтувати порівняно із зосередженою масою. В якості зосередженої маси розглянуто електронні

компоненти, або групу компонентів, маса яких переважає масу самої плати і таким чином створює нерівномірність навантаження коливальної системи.

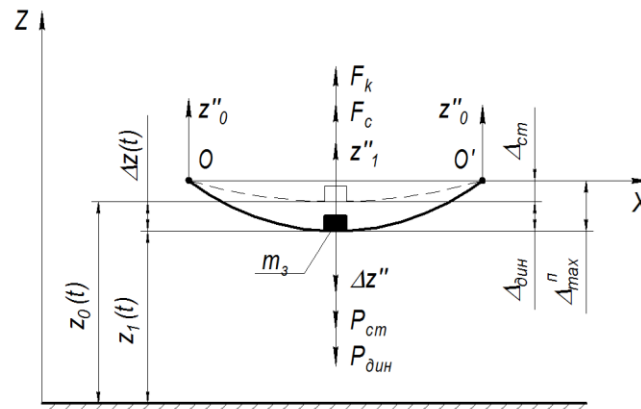


Рис. 1. Схема динамічного навантаження друкованої плати представлена двохопornoю балкою із зосередженою масою

Балка встановлена на двох опорах – нерухомій O (з одним степенем вільності) та рухомій O' (з двома степенями вільності) шарнірних опорах (для спрощення схеми вид опор на рис. 1 не показано), через які балка піддається дії зовнішнього силового навантаження.

Відносно інерціальної системи відліку, наприклад нерухомої опори O, на якій стоїть сам вібростенд, коливання маси m_3 відбувається із прискоренням z_1'' , яке виникає внаслідок кінематичного збудження від коливання кінців балки, до яких прикладене динамічне навантаження, і які здійснюють рух із заданим прискоренням z_0'' . Абсолютне прискорення z_1'' маси m_3 відносно інерціальної системи відліку може бути виражене через відносне та переносне прискорення (із врахуванням їх величини та напрямку дії відносно осі Z) як: $z_1'' = -\Delta z'' + z_0''$. Тоді рівняння руху в неінерціальній системі відліку, тобто відносно опор O та O', отримує вигляд (знаки призначенні у відповідності до напрямку осі Z):

$$m_3 \Delta z'' + F_k + F_c = m_3 z_0'', \quad (1)$$

де $m_3 \Delta z''$ – відносна сила інерції; $m_3 z_0''$ – переносна сила інерції; $F_k = k \Delta z$ – сила пружності; $F_c = c \cdot \Delta z'$ – сила згасання коливань.

У скороченому вигляді:

$$\ddot{q} + \omega_0^2 q + 2l\dot{q} = \ddot{z}_0, \quad (2)$$

де $q = q(t)$ – шукана функція переміщення маси m_3 .

Оскільки коливання задаються на платформі вібростенда, яка здійснює вертикальний рух паралельно осі Z за законом гармонічних коливань:

$$z_0(t) = Z_0 \sin(\omega t), \quad (3)$$

де Z_0 – амплітуда; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, f – частота; t – час; φ – фаза коливань.

Тоді отримане диференціальне рівняння (2) є ідентичним рівнянню [1, 2] і його розв'язок має вигляд ідентичний [1, 2]:

$$q(t) = \frac{Z_0 \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2l\omega)^2}} \cdot \sin\left(\omega t - \arctg\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2l\omega}\right)\right), \quad (4)$$

або з врахуванням відповідних позначень:

$$f(t) = A \sin(\omega t - \varphi). \quad (5)$$

Визначення рівнодіючої сили динамічного навантаження. Як показано на (рис. 1) функція (4) описує прогин балки, який відбувається відносно положення статичної рівноваги коливальної системи $\Delta_{ст}$. Із врахуванням положення статичної рівноваги та амплітуди коливань A їх сума складає повний прогин

Δ_{max}^n . Повний прогин відбувається під дією рівнодіючої сили P , представленої сумарною дією динамічного навантаження $P_{дин} = -F_k$ та статичного навантаження сили тяжіння зосередженої маси $P_{ст} = m_3g$:

$$P = P_{дин} + P_{ст} = \frac{\Delta_{max}^n}{\delta}, \quad (6)$$

де δ – прогин (податливість) балки під дією сили $P = 1$.

Податливість балки за напрямом прикладення та від дії одиничної сили $P = 1$ визначена за інтегралом Мора:

$$\delta = \sum_{\zeta} \int_{x_{\zeta}} \frac{(M_{\zeta}^1)^2}{EJ} dx, \quad (7)$$

де ζ – номер ділянки навантаження; x_{ζ} – довжина; M_{ζ}^1 – внутрішній згинальний момент за напрямом та від дії одиничної сили (табл. 1); E та J – модуль Юнга та осьовий момент інерції площі перерізу балки відповідно.

Таблиця 1

Внутрішні моменти опору ділянок навантаження балки			
Ділянка навантаження	$0 \leq x \leq a$	$a \leq x \leq d$	$d \leq x \leq l$
$M_1^1(x)$	$x \left(1 - \frac{d}{l}\right)$		$d \left(1 - \frac{x}{l}\right)$
$M_P^1(x)$	$Px \left(1 - \frac{a}{l}\right)$	$Pa \left(1 - \frac{x}{l}\right)$	

Формула податливості отримана згідно гіпотези про те, що волокна балки не чинять тиску один на одного, тобто напруження у напрямку перпендикулярному осі балки рівні нулю. Тому достатнім є розгляд тільки внутрішніх згинальних моментів, тоді як дією внутрішніх поперечних сил можна знехтувати.

Якщо скористатись схемою навантаження (рис. 2) та формулою (7) податливість в місці прикладання сили P та за умови, що $P = 1$:

$$\delta = \frac{x^2(x-l)^2}{3EI}. \quad (8)$$

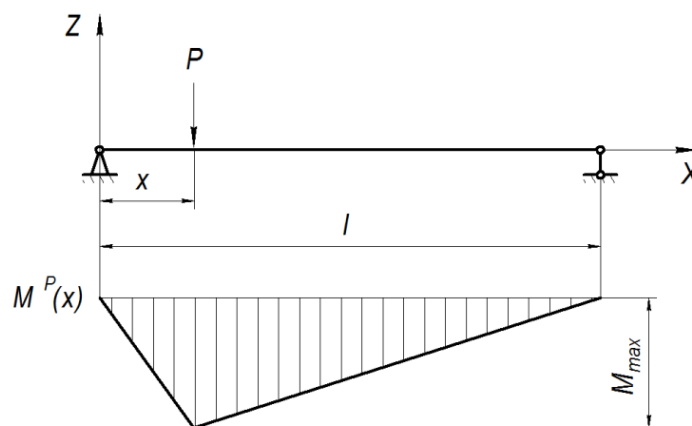


Рис. 2. Схема навантаження та епюра згинальних моментів від діючої сили P

За формулами (4)–(6) вираз для рівнодіючої сили P :

$$P = m_3 Z_0 \omega^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4n^2 \omega^2}{\omega_0^4}}} + m_3 g, \quad (9)$$

або:

$$P = P_0 \cdot k_a + P_{ст}, \quad (10)$$

де $P_0 = m_3 Z_0 \omega^2$ – амплітудне значення заданого динамічного навантаження, k_a – коефіцієнт зростання амплітуди коливань.

Математична модель оцінки міцності. Для оцінки міцності використано найбільші повні нормальні напруження, які визначені за формулою згину балки:

$$\sigma_{max}^n = \frac{M_{max}}{W_{oc}}, \quad (11)$$

де M_{max} – максимальний внутрішній згинальний момент; W_{oc} – осьовий момент опору, який для прямокутного перерізу визначено за [11].

Максимальний внутрішній згинальний момент відповідає згинальному моменту від рівнодіючої сили P в поперечному перерізі балки із координатою x , як це видно із епюри моментів (рис. 2), і визначається як:

$$M_{max} = P \cdot x \left(1 - \frac{x}{l}\right). \quad (12)$$

Використання формул (9) – (12) дозволяє здійснювати оцінку напруженого стану друкованих плат представлених балкою із зосередженою масою у визначеному експлуатаційному діапазоні частот коливань:

$$\sigma_{max}^n = \left[Z_0 \omega^2 m_3 \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\eta^2 \omega^2}{\omega_0^4}}} + m_3 g \right] \times \frac{6x}{bh^2} \left(1 - \frac{x}{l}\right). \quad (13)$$

Математична модель оцінки жорсткості. Для оцінки жорсткості плат використано максимальні переміщення – прогини плати. Слід зазначити, що найбільший прогин балки співпадає із місцем прикладення діючої сили тільки у випадку коли сила прикладена в центрі балки. У випадку коли зосереджена маса, як і діючі завдяки їй сили інерції, прикладені не по центру, то найбільший прогин балки не буде співпадати із місцем прикладення сил. Проте визначення максимального прогину дозволить здійснювати оцінку жорсткості, визначити вібраційні характеристики конструкції та оцінити можливість зіткнень та ударів з іншими (сусідніми) елементами конструкції корпусу, або платами.

Для визначення максимального прогину (стріли прогину), у відповідності до методу Мора [11], представлено схему навантаження (рис. 3) та епюри згинальних моментів від діючої на тіло сили P та одиничної сили $X_1 = 1$.

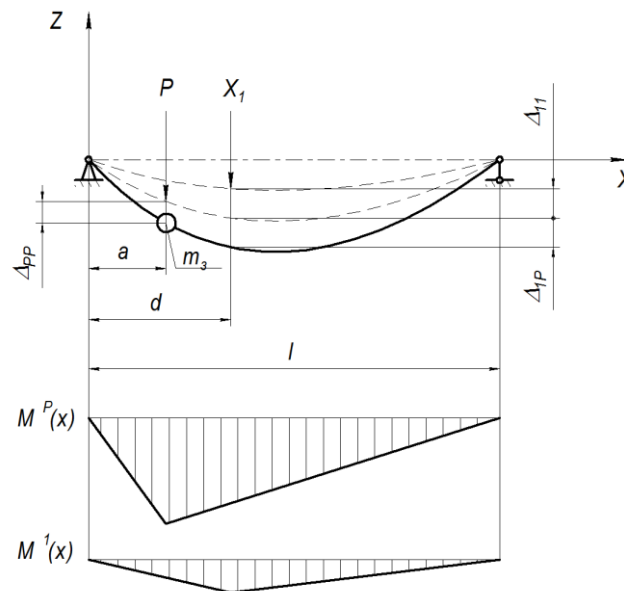


Рис. 3. Схема навантаження та епюри згинальних моментів від діючої та одиничної сили

Серед прогинів Δ_{ij} показаних на рис. 3, які відбуваються за напрямом сили « i » та від дії сили « j », шуканим є прогин Δ_{1P} – прогин за напрямом сили X_1 від дії сили P . Цей прогин можна визначити із рівності зовнішньої та внутрішньої робіт:

$$W_{1P} = W_{1P}^B,$$

що виконує сила X_1 на переміщенні Δ_{1P} :

$$\Delta_{1P} = \sum_k \int_x \frac{M_k^1 M_k^P}{EI} dx, \quad (14)$$

де M_k^1 – внутрішній згинальний момент за напрямом та від дії одиничної сили X_l ; M_k^P – внутрішній згинальний момент від дії зовнішнього навантаження P за напрямом дії одиничної сили X_l . Вирази функцій внутрішніх згинальних моментів, отримані із застосуванням методу перерізів, наведені в таблиці 1.

Прогин балки (14) під дією зосередженої сили P за напрямом сили X_l виражено, як функцію лінійної координати d вздовж осі балки X . Заради універсальності запису приймемо позначення $x = d$, тоді запис функції по аргументу x буде мати вигляд:

$$\Delta_{1P}(x) = \frac{Pa(x-l)(x^2-2lx+a^2)}{6EI}. \quad (15)$$

Область визначення представленої функції при $a \leq l/2$ відповідає інтервалу $a \leq x \leq l$, який відповідає ділянці найбільшого прогину (див. рис. 3).

Екстремум функції (15) відповідає найбільшому прогину балки при аргументі $x_0 = l - \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{l^2 - a^2}$:

$$\Delta_{1P}^{max}(x_0) = \frac{\sqrt{3}Pa(l^2 - a^2)^{\frac{3}{2}}}{27EI}, \quad (16)$$

що також видно з графіка залежності $\Delta_{1P}(x)$ представленою на рис. 4. Прогин в цій координаті є стрілою прогину, яка використовується для оцінки жорсткості балки порівнянням із допустимим прогином, який в свою чергу визначається експериментальним шляхом.

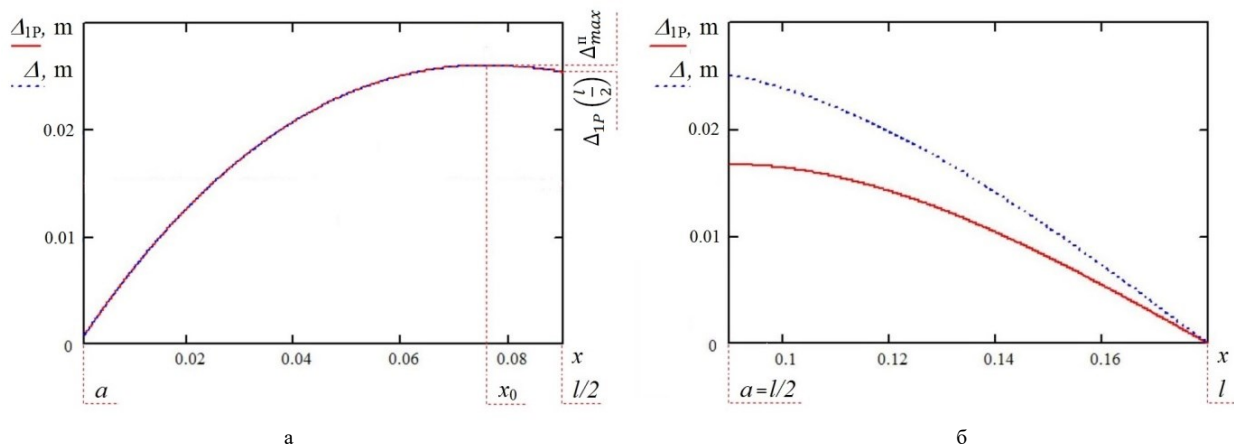


Рис. 4. Діаграма прогину вздовж осі балки при: а) $a \rightarrow 0$; б) $a \rightarrow l/2$

Іншим способом визначення прогину балки є використання наближеного диференційного рівняння зігнутої осі балки [11]:

$$EJ\Delta''(x) = M(x). \quad (17)$$

Для визначення прогину використовується схема навантаження силою P (рис. 3), але без використання одиничного зусилля X_l . Очевидно, що стріла прогину лежить на ділянці навантаження $a \leq x \leq l$. Подвійне інтегрування диференційного рівняння (17), тобто функцій моментів внутрішнього опору отриманих в таблиці 1 дає рівняння прогину:

$$EJ\Delta_1(x) = \frac{Pax^2}{2} - \frac{Pax^3}{6l} + C_1x + D_1. \quad (18)$$

Подвійне інтегрування (17) на ділянці $0 \leq x \leq a$:

$$EJ\Delta_2(x) = \frac{Px^3}{6} \left(1 - \frac{a}{l}\right) + C_2x + D_2. \quad (19)$$

Постійні інтегрування C_1 , D_1 і C_2 , D_2 визначаються із умов опори балки в обох ділянках:

$$1) \Delta_2(0) = 0; 2) \Delta_1(l) = 0; 3) \Delta_1(a) = \Delta_2(a).$$

Тоді $D_1 = 0$, та $C_1 = -\frac{P \cdot a \cdot l}{3}$.

Рівняння прогину балки на ділянці $a \leq x \leq l$:

$$\Delta(x) = \frac{Pa(x-l)(x^2-2lx)}{6lEI}. \quad (20)$$

Екстремум отриманої функції (20) відповідає стрілі прогину балки при аргументі $x_0 = l - \frac{\sqrt{3}}{3}l$:

$$\Delta_{\max}(x_0) = \frac{\sqrt{3}Pal^2}{27EI}, \quad (21)$$

що також видно із графіку залежності $\Delta(x)$ представленою на рис. 4.

Порівняльний аналіз формул (15) та (20) показує незначні розбіжності діаграм прогину (див. рис. 4, а) при $a \rightarrow 0$ і які досягають максимуму при $a \rightarrow l/2$ (див. рис. 4, б), проте перша формула характеризується більшою точністю обрахунку. Аналіз формул для визначення стріли прогину (16) та (21) показує, що вона близька до прогину по центру балки і навіть у самому несприятливому випадку коли $a \rightarrow 0$ (див. рис. 4, а)

різниця між стрілами прогинів $\Delta_{\max}^n$ та прогинами по центру балки $\Delta_{1P}\left(\frac{l}{2}\right)$ не перевищує 3 %.

Отже для оцінки жорсткості, без суттєвої втрати точності, можна використовувати прогин по центру досліджуваної конструкції, використовуючи формулу (15) при $x = l/2$:

$$\Delta_{\max}^n \approx \Delta_{1P}\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{P(3al^2-4a^3)}{48EI}. \quad (22)$$

Отримані результати. Об'єктами дослідження найбільших повних нормальних напружень та максимальних прогинів друкованих плат були зразки плат із наступними характеристиками: габаритні розміри $l = 180$ мм, $b = 50$ мм, $h = 1,5$ мм; основа плати виконана із склотекстоліту КАСТ-В, $E = 14$ ГПа, $\rho = 1600$ кг/м³, $\sigma_{Вст} = 160-300$ МПа, вузли паяних з'єднань електронного модуля виконані припоєм ПОС 40, $\sigma_{Впз} = 40$ МПа; коефіцієнт демпфірування коливань плати, визначений експериментально [1] $n = 10,96$ 1/с; маса електронного модуля (зосереджена маса) $m_z = 50$ г. Друкована плата піддається дії динамічного навантаження за схемою (рис. 1).

Допустиме напруження всієї конструкції плати визначається відносно границі міцності її конструктивного елемента, в якого це значення найменше. Як було визначено в [12,13] саме до таких елементів відносяться паяні з'єднання. Неточність значення границі міцності припою, пов'язана із нехтуванням впливу конструкторських і технологічних факторів з'єднання, враховується коефіцієнтом запасу міцності $s = 2,5$, який забезпечує напруження в межах ділянки пропорційності на діаграмі розтягу матеріалу припою і не знижує міцності паяного з'єднання. Таким чином допустиме значення напруження всієї плати визначається за формулою [12, 13]:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{Впз}}{s} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ МПа}. \quad (23)$$

На рис. 5 показано розраховану амплітудно-частотну характеристику найбільших нормальних напружень та максимального прогину, які виникають в тілі друкованої плати під дією динамічного навантаження із заданою амплітудою коливань $Z_0 = 1$ мм. При цьому електронний модуль, як зосереджену масу встановлено по центру плати, тобто $x = l/2$.

Амплітудно-частотна характеристика максимальних напружень $\sigma_{\max}^n(\omega)$ розрахована за (12) показує наявність резонансу на круговій частоті коливання $\omega_0 \approx 180,2$ рад/с (28,67 Гц). Графічним способом можна визначити діапазони частот де напруження не перевищують допустимий рівень, це до-резонансний діапазон: до 160,8 рад/с та за-резонансний діапазон: від 208,9 рад/с. В діапазоні біля резонансу напруження є потенційно небезпечними і руйнівними. Таким чином можна дати рекомендацію про допустимий експлуатаційний діапазон частот вібрацій, хоча їх регламентація не завжди досяжна на практиці.

Амплітудно-частотна характеристика максимальних прогинів $\Delta_{\max}^n(\omega)$ розрахованих за (22) теж дозволяє визначити допустимий прогин друкованої плати в до- та зарезонансних діапазонах частот коливання плати визначених із АЧХ напружень (рис. 5, а), тоді $[\Delta] \approx 4$ мм (див. рис. 5, б).

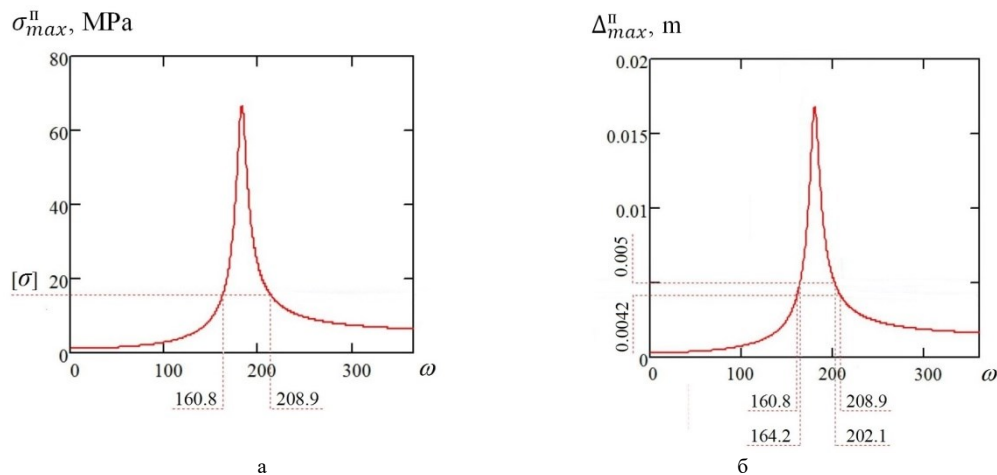


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика максимальних напружень (а) та максимального прогину (б) плати

Проте допустимий прогин може бути уточнений за методикою визначення допустимого короблення основи плат [12]. Як показано на рис. 5, б уточнений допустимий прогин $[\Delta]' = 5$ мм дозволяє навіть розширити робочий діапазон частот від 0 до 164,2 рад/с та від 202,1 рад/с і вище без порушення умов жорсткості та експериментально підтверджені умови міцності.

Безперечно бажаною метою наступного дослідження є забезпечення міцності плат навіть в умовах резонансного збудження без прив'язки до конкретного діапазону частот вібрацій. Очевидно, що міцність, жорсткість та вібраційні характеристики плат, зокрема їх резонансні частоти, залежать від багатьох факторів, серед яких найбільшу увагу для практичного використання заслуговує конструктивне виконання плат, а саме їх геометричні параметри, зміна яких призводить до зміни внутрішніх сил і моментів опору, та відповідно до змін значень переміщень та напружень, які виникають в платах в процесі динамічного навантаження.

Висновки. Розроблено математичну модель розрахунку динамічних деформацій та напружень в друкованих платах, в якій циліндричний згин плати представлено як згин безлічі балок-смуг прямокутного перетину і виділено як окремо коливальну систему представлену невагомою двохопornoю балкою із розташованою по центру зосередженою масою, яка створює нерівномірність навантаження коливальної системи та здійснює відносний рух в неінерціальній системі відліку, що дозволяє визначати найбільші повні нормальні напруження та прогини, які відбуваються в небезпечному перерізі тіла друкованої плати для оцінки міцності та жорсткості, з використанням методів опору матеріалів.

Запропонована оцінка міцності та жорсткості конструкції друкованих плат, яка здійснюється за допустимим напруженням всієї конструкції плати, яке визначається відносно експериментально визначеної границі міцності паяних з'єднань друкованої плати із коефіцієнтом запасу міцності $s = 2,5$, який забезпечує напруження в межах ділянки пропорційності матеріалу паяного з'єднання, дозволила уточнити допустимий діапазон коливань за амплітудно-частотною характеристикою найбільших нормальних напружень та максимального прогину, які виникають в тілі друкованої плати під дією динамічного навантаження із заданою амплітудою коливань.

References

1. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński // 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. MATEC Web Conf. (ISSN: 2261-236X), 182, 02015 (2018) – 10 p.
2. Boiko J. Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON - 2017) : Proceedings of a meeting held, 29 May -2 June 2017, Kiev, Ukraine, 2017. – P. 514-517.
3. Cevdet N. I. Stresses in Microelectronic Circuits in Reference Module / N. I. Cevdet / Materials Science and Materials Engineering, 2016.
4. Royzman V. Ways to improve strength reliability of electronics elements and systems / V. Royzman / Proc. of IEEE Conf. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Lviv-Slavsko, 2002, – P. 187-190.
5. Modeling the Elastic Behavior of an Industrial Printed Circuit Board Under Bending and Shear / Kuan Teng Loon, C. Kok, Ervina Efzan Mohd. Noor, C. C. Ooi / Proc. of IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 21 November 2018. – Vol.: 9, Iss. 4 – P. 669-676.
6. Wong E-H Dynamic deformation of a printed circuit board in drop-shock in Robust Design of Microelectronics Assemblies Against Mechanical Shock / E-H Wong, Y-W Mai / Temperature and Moisture, Woodhead Publishing, 2015, – P. 327-378.
7. Allaparthi M. Three-dimensional finite element dynamic analysis for micro-drilling of multi-layered printed circuit board / M. Allaparthi / Materials Today: Proc. 5(2), 2018, – P. 7019-7028.
8. Kim Y. K. Analyses on the large size PBGA packaging reliability under random vibrations for space applications / Y. K. Kim / Microelectronics Reliability, 2020.

9. Xiao W. Vibration reduction design of extension housing for printed circuit board based on particle damping materials / W. Xiao / *Applied Acoustics*, 2020.
10. Veeramuthuvel P. Vibration suppression of printed circuit boards using an external particle damper / P. Veeramuthuvel, K. K. Sairajan, K. Shankar // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – P. 98-116.
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. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol 22 № 6 (2016). – P: 494–489. ISSN 1392–1207.
13. I. Kovtun, V. Royzman, A. Voznyak 2018 Acoustic emission diagnostics of solder joints on printed circuit boards *Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice*. JVE Book Series on Vibroengineering. Volume 2. JVE International Ltd. – Vilnius, Lithuania. 2018. – P. 214-229. ISSN 2351-5260.

УДК 621.3:681.2:681.586.773
DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-17

МАТУС С. К.

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

КВАСНИКОВ В. П.

Національний авіаційний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОПРИВОДА ДЛЯ МІКРОНАСОСА

У роботі досліджені статичні характеристики п'єзопривода багатошарової структури для мікронасоса перистальтичного типу. Розраховані переміщення багатошарового п'єзоелектричного актюатора, при поздовжньому п'єзо ефекті і управлінні за напругою, який армовано пружним елементом та з'єднано з мембраною із полімерного ауксетика. Для практичного використання п'єзоприводів багатошарової структури необхідні знання їх основних характеристик: п'єзомодулів, пружних податливостей, модулів пружності полімерного ауксетика.

Ключові слова: п'єзопривод, мікронасос, статична характеристика, ауксетик, п'єзоелемент.

S. MATUS

State University of Intellectual Technologies and Communications

V. KVASNIKOV

National Aviation University

MODELING OF STATIC CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC ACTUATOR FOR A MICROPUMP

The pace of development of precision technologies is growing every year, which is inextricably linked with the improvement of precision dosing systems, positioning for promising areas of science and technology, such as robotics, laser technology, active and adaptive optics, medicine, biotechnology, nanotechnology, engineering and . Accordingly, with the creation of such modern systems, the requirements for accuracy, operating frequencies, generating forces, power actuators, etc. are growing. for modern equipment.

The piezoelectric actuator in the micropumps allows rate changes of flow for a wider range. Promising to ensure the continuity and accuracy of fluid supply are peristaltic micropumps with piezodrive, which create the fluid movement due to the bending deformation of the tube of the channel associated with the longitudinal or transverse piezoelectric effect. The study of the micropump actuator static and dynamic characteristics as an object of control is necessary to calculate the control systems of piezoelectric actuators for pumping small volumes of liquids. The static characteristics of multilayer connectors for peristaltic micropump had explored during the work. The multilayer piezoelectric actuator displacements with a longitudinal piezoelectric effect and voltage control, which is reinforced with an elastic element and connected to a membrane of polymer auxetic are calculated. The use of membranes from the auxetic in the design of the micropump will improve its functional and structural characteristics. The piezoelectric actuators of multilayer structure practical use needs knowledge of their basic characteristics: piezomodules, elastic ductility, modules of elasticity of polymeric auxetic. To increase the rigidity of the multilayer piezoelectric actuator mechanical characteristics its design is selected from the minimum elastic reporting.

Key words: piezoelectric actuator, micropump, static characteristic, auxetic, piezoelectric element.

Вступ. Темп розвитку прецизійних технологій зростає з кожним роком, що нерозривно пов'язано із удосконаленням систем прецизійного дозування, позиціонування для перспективних напрямків науки і техніки, таких як робототехніка, лазерні технології, системи активної і адаптивної оптики, медицина, біотехнології, нанотехнології, машинобудування та ін. Відповідно при створенні таких сучасних систем зростають і вимоги до точності, робочих частот, генеруючих зусиль, потужності виконавчих механізмів та ін. Використання точних електромеханічних приводів, які працюють на основі електромагнітопружності (п'єзоелектричного, п'єзомагнітного, електрострикційного, магнітострикційного ефектів) перспективно для сучасного обладнання.

В системах управління для підвищення точності і неперервності перекачування рідин малого об'єму, а також для точного позиціонування та переміщення об'єктів з нано- і мікрометровою точністю, використовують виконавчі п'єзоелектричні механізми – актюатори [1–3], які працюють на основі зворотного п'єзо ефекту, при цьому переміщення досягається за рахунок деформації п'єзоелемента при прикладанні зовнішньої електричної напруги. У найпростішому випадку п'єзоактюатором називають п'єзоелемент закріплений певний чином. П'єзоелектричні актюатори забезпечують переміщення від одиниць до 200–300 мкм із точністю 0,01–0,005 нм, вони розвивають зусилля до 50 кН, мають високу чутливість, а резонансна частота рухомої частини привода може сягати декілька десятків кілогерц [3]. Такі точні п'єзоелектричні приводи працюють у межах робочих навантажень, забезпечуючи тим самим пружні деформації виконавчого механізму.

Аналіз останніх досліджень. Існують різні фізичні принципи побудови мікронасосів для перекачування рідин малого об'єму, в роботах [4–5] наведена їх детальна класифікація. У роботі [6]

наведений аналіз різних приводів і показано, що п'єзоелектричний привод в мікронасосах дозволяє отримати більш широкий діапазон зміни швидкості потоку, від 0,015 мл/хв до 90,28 мл/хв при поперечному перерізі каналу 1 мм² і тиску до 200 кПа.

В роботі [7] наведений детальний огляд мікронасосів, згідно класифікації п'єзоелектричні мікронасоси поділяють на два основні типи: мембранні і перистальтичні. На відміну від класичних перистальтичних насосів [8], в яких робоча рідина переміщується в середині еластичної трубки, яка періодично стискується роликми, які по ній переміщуються, а відновлення об'єму робочої камери відбувається за рахунок пружності трубки, у п'єзонасосах скорочення або збільшення об'єму камери відбувається примусово п'єзоелектричним деформуванням її стінок. Пристрій перистальтичного типу, що містить п'єзопривод, складається із послідовно деформуючих робочих камер [5, 9]. Для перекачування рідин використовують біжучу хвилю деформацій замкнутого об'єму. Енергія біжучої хвилі передається руху рідини яка перекачується. Хвилеподібний рух утворюється від стиснення або розтягування п'єзоелементів, при подачі на них змінної збуджуючої напруги. Форма хвилі і робочий об'єм залежать від напруги на кожному п'єзоелементі. Продуктивність насосу визначається частотою напруги живлення і об'ємом камери. Основними перевагами перистальтичних п'єзонасосів є забезпечення безперервності та точності подачі рідини, незначний перепад тиску, здатність перекачувати в'язкі і чутливі до змішування рідини, простота конструкції. Відомі конструкції мікронасосів мембранного типу, наприклад, мають впускні і випускні клапани або декілька камер [6], які з'єднуються каналами або використовується елемент дифузор-сопло [10], працюють дискретно, що не дає змоги забезпечити рівномірного перекачування рідини. Отже, найбільш перспективними є перистальтичні мікронасоси із п'єзоприводами, що створюють рух рідини за рахунок деформації згину трубки каналу п'єзоелементом на основі поздовжнього або поперечного п'єзоефекту.

Постановка задачі. Дослідження статичних і динамічних характеристик актюатора мікронасосу, як об'єкта управління, необхідно для розрахунку систем управління п'єзоприводами для перекачування рідин малого об'єму. Тому в роботі пропонується дослідити статичні характеристики п'єзопривода багат шарової структури для мікронасоса перистальтичного типу та визначити переміщення багат шарового армованого п'єзоелектричного актюатора при поздовжньому п'єзоефекті і управлінні за напругою.

Вирішення поставленої задачі. П'єзопривод при поздовжньому п'єзоефекті представляє собою пластину (рис. 1), товщиною δ з електродами, які нанесені на грані, що перпендикулярні до вісі 3, площа яких дорівнює S_0 .

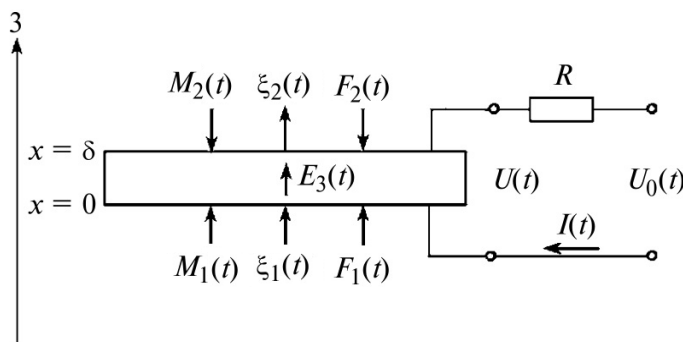


Рис. 1. Схема п'єзопривода при поздовжньому п'єзоефекті

Рівняння електропружності для зворотного п'єзоефекту при управлінні п'єзоприводом за напругою має вигляд:

$$S_3 = d_{33} E_3(t) + s_{33}^E T_3(x, t), \quad (1)$$

де $S_3 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ – відносне зміщення перерізу п'єзоелемента по вісі 3, де ξ – переміщення; d_{33} –

п'єзомодуль при поздовжній поляризації пластини (поздовжній п'єзоефект); $E_3(t) = U(t)/\delta$ – напруженість електричного поля у п'єзоприводі по вісі 3, де $U(t)$ – напруга на електродах п'єзоелемента, δ – його товщина; $s_{33}^E = 1/E_{\text{ю}}$ – пружна податливість по вісі 3, $E_{\text{ю}}$ – модуль Юнга п'єзокерамічної кераміки; $T_3 = -F/S_0$ – механічна напруга у п'єзоприводі; F – зовнішня сила; S_0 – площа перерізу п'єзоелемента.

Кінематична схема багат шарового п'єзопривода мікронасосу представлена на рис. 2. На відміну від простого п'єзоелемента, п'єзопривод багат шарової структури має у статиці без навантаження збільшений в n разів діапазон переміщення, що залежить від числа п'єзошарів. П'єзошари з'єднані механічно послідовно, а електрично – паралельно.

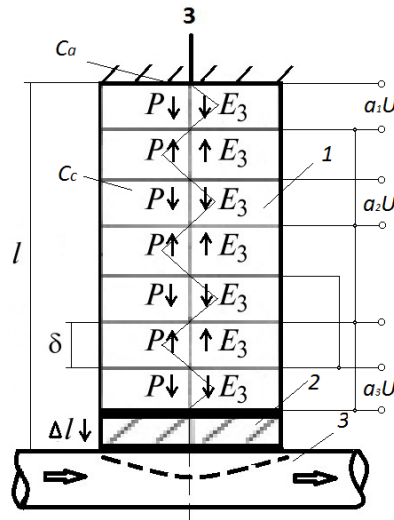


Рис. 2. Кінематична схема п'єзопривода мікронасосу багат шарової структури
1 – п'єзоактюатор; 2 – мембрана із полімерного ауксетика; 3 – еластична трубка

З рівняння зворотного п'єзо ефекту (1) при $E = const$ отримуємо рівняння статичної характеристики при поздовжньому п'єзо ефекті і управління за напругою

$$\Delta l = d_{33} n U - s_{33}^E F l / S_0 \quad (2)$$

де Δl – переміщення п'єзопривода; $l = n \delta$ – довжина; n – кількість п'єзо елементів; δ – довжина п'єзо елемента.

У статичі при поздовжньому п'єзо ефекті при управлінні за напругою при $F = 0$ максимальне переміщення п'єзопривода багат шарової структури буде мати вигляд: $\Delta l_{max} = d_{33} n U_{max}$, де U_{max} – максимальна напруга на електродах.

Отримуємо відносно переміщення приводу

$$\frac{\Delta l}{l} = d_{33} \frac{U}{\delta} - s_{33}^E \frac{F}{S_0}.$$

Жорсткість навантаження є основним параметром зовнішнього навантаження п'єзопривода, що визначає його конструктивні параметри і є відношенням сили пружної реакції навантаження до деформації навантаження. Отже, відповідно знайдемо переміщення для п'єзопривода багат шарової структури із врахуванням жорсткості:

$$\Delta l = d_{33} n U - \frac{F}{C_c} \quad (3)$$

де $C_c = \frac{S_0}{s_{33}^E l}$ – жорсткість багат шарового п'єзопривода із управлінням за напругою при

поздовжньому п'єзо ефекті; $F = F_0 + C_a \Delta l$ – зовнішня сила; $F_0 = \sigma_{a0} S_0$ – сила попереднього початкового підтискання пружним елементом; σ_{a0} – механічна напруга армування у п'єзоприводі; C_a – жорсткість армуючого елемента.

Розглянемо статичні характеристики приводу багат шарової структури, армованого пружним елементом з'єднаного з мембраною із полімерного ауксетика, при управлінні за напругою. Ауксетика – це матеріали з нелінійними і аномальними деформаційними властивостями, які дозволяють отримати адаптивну (приспосувальну) механічну реакцію матеріалу на зовнішній вплив [11], вони демонструють поведінку з від'ємним коефіцієнтом Пуассона. Використання в конструкції мікронасосу мембрани із ауксетика дозволить покращити його експлуатаційні і конструктивні характеристики. Отже, вираз для переміщення приводу багат шарової структури, армованого попружним елементом з'єднаного з мембраною із полімерного ауксетика:

$$\Delta l = d_{33} n U - \frac{\sigma_{a0} S_0 + C_a \Delta l + \frac{\Delta l}{l} E_{e1} S_0 + \frac{\Delta l}{l} E_{e2} S_1}{\frac{S_0}{s_{33}^E l}}$$

$$\Delta l = \frac{d_{33} n U - s_{33}^E l \sigma_{a0}}{1 + \left(\frac{C_a l}{S_0} + E_{1e} + k E_{2e} \right) s_{33}^E},$$

де $k = \frac{S_1}{S_0}$; $E_{1e} = 2,95 \cdot 10^9$ Н/м² – ауксетик; $E_{2e} = 5,5 \cdot 10^9$ Н/м – поліпропілен

$$\Delta l = \frac{d_{33} n U - s_{33}^E n \delta \sigma_{a0}}{1 + (2 E_{1e} + k E_{2e}) s_{33}^E}, \quad (3)$$

Статичні характеристики (рис. 3) п'єзоелектричного привода мікронасоса отримані для п'єзопластин із кераміки ЦТС-19: $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В – п'єзомодуль; $l = 1 \cdot 10^{-3}$ м – довжина багатошарового п'єзопривода; $s_{33}^E = 3 \cdot 10^{-11}$ м²/Н – пружна податливість по вісі 3; $S_0 = 10 \cdot 10^{-3}$ м² – площа перерізу п'єзоелемента; $S_1 = S_0$; $\sigma_{a0} = 5 \cdot 10^5$ – механічна напружка армування у п'єзоприводі; $\delta = 1 \cdot 10^{-5}$ м – товщина п'єзоелемента; $n = 10 \dots 24$ кількість шарів; $U = 100 \dots 500$ В напружка збудження; $E_{1e} = 2,95 \cdot 10^9$ Н/м² – модуль пружності ауксетика [12]; $E_{2e} = 5,5 \cdot 10^9$ Н/м – модуль пружності поліпропілену.

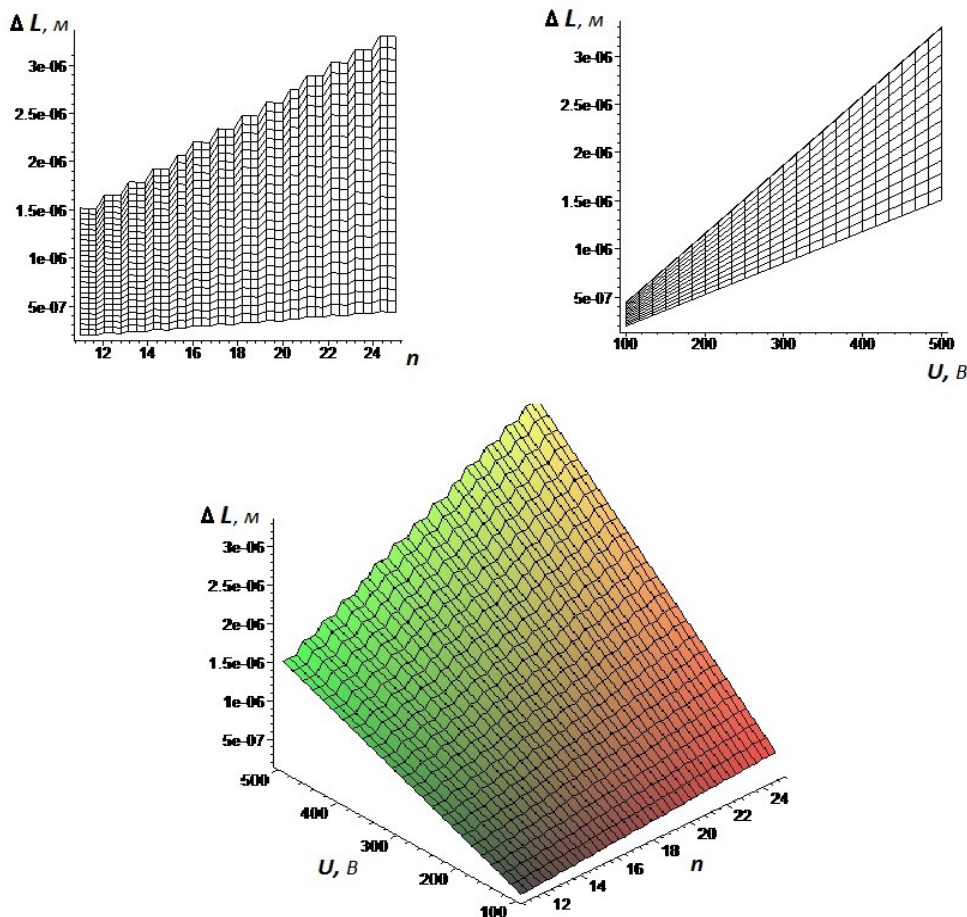


Рис. 3. Статичні характеристики п'єзопривода багатошарової структури при управлінні за напругою

Аналіз отриманих результатів показує, що при управлінні за напругою переміщення із врахуванням жорсткості в залежності від кількості п'єзоелементів у структурі актюатора, складає від $5 \cdot 10^{-7}$ м до $3 \cdot 10^{-6}$ м,

тобто діапазон переміщення п'єзопривода пропорційний п'єзомодулю і напруги живлення. Для ефективного використання робочого діапазону переміщень потрібно враховувати жорсткість багат шарового привода.

Висновки. Отримані характеристики п'єзопривода багат шарової структури для мікронасоса, армованого пружним елементом з'єднаного з мембраною із полімерного ауксетика, при управлінні за напругою дозволяють розрахувати статичні режими роботи багат шарових приводів в залежності від їх фізичних і геометричних параметрів. Використання в конструкції мікронасосу мембрани з ауксетика дозволить покращити його конструктивні і експлуатаційні характеристики.

References

1. Bardin V. A. Kontrol i upravlenie v sistemah precizionnogo pozicionirovaniya na osnove piezoelektricheskij aktuatorov / V. A. Bardin, V. A. Vasilev, P.G. Rudakov, R.V. Yulovskov // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo». – 2016. – Tom. 1. – S. 308-312.
2. Amelchenko A. G. Usilivayushchij differentsialnyj piezoelektricheskij aktuator dlya sistem upravleniya vysokotochnogo pozicionirovaniya / A. G. Amelchenko, V. A. Bardin, V. A. Vasilev, P.S. Carev // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo». – 2018. – Tom. 2. – S. 120-125.
3. Levashkin D.G. Sistemy avtomaticheskogo kontrolya: ucheb. posobie / D.G. Levashkin: - Tolyatti: TGU. 2008. – 128 s.
4. Nisar, A. Afzulpurkar, N. Mahaisavariya, B., Tuantranont, A. MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. Sensors and Actuators B: Chemical. 130(2), 917-942 (2008); doi:10.1016/j.snb.2007.10.064.
5. Brian D. Iverson, S.V. Garimella. Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. Microfluid Nanofluid (2008)5: 145-174; doi:10.1007/s10404-008-0266-8.
6. Farid Amirouche, Yu Zhou, Tom Johnson. Current micropump technologies and their biomedical applications. Microsystem Technologies 15, 647-666 (2009); doi:10.1007/s00542-009-0804-7.
7. Laser D.J., Santiago J.G. A Review of Micro Pumps. Journal of Micromechanics and Microengineering 14(6):R35 (2004); doi:10.1088/0960-1317/14/6/R01.
8. Jozsef Klepsitz, Levente Kovacs. Peristaltic pumps – a review on working and control possibilities. IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. pp. 191-194 (2014); doi:10.1109/SAMI.2014.6822404.
9. Cohen Y. B., Chang Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump. In: Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, SPIE, 2001, 4327: 425-432.
10. Ali Ostadfar, E.H. Ravich. Issledovanie harakteristik implantiruемого besklapannogo nasosa dlya biologicheskikh zhidkostej i lekarstvennyh sredstv // Medicinskaya tekhnika. 2013. № 1(277). S. 42-46.
11. N. Novak, M. Borovinsek, M. Vesnjak, C. Körner, S. Tanaka, K. Hokamoto, Z. Ren, Phys. Status Solidi B 256(1), 1800040 (2019); doi:10.1002/pssb.201800040.
12. ShevchukT., BoryukM., KrivtsovV., KuklaV. and MashchenkoV. Viscoelastic Properties of Filled Polyurethane Auxetics. Physics and Chemistry of Solid State. 22, 2 (Jun. 2021), 328-335; doi:10.15330/pess.22.2.328-335.

УДК 004.9.056:796(477)

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-18

КУЗЬМЕНКО О. В., МИНЕНКО С. В., ГРИЦЕНКО К. Г., ЯЦЕНКО В. В.

Сумський державний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ КІБЕРСПОРТИВНОЇ ГАЛУЗІ

У статті розглянуто динаміку та поведінку кіберспортивної індустрії на світовому рівні та стан кіберспорту як індустрії в Україні. Визначено основні досягнення кіберспортивної сфери України. Проведено статистичний аналіз доходу кіберспортивної індустрії, сукупної аудиторії кіберспортивних ігор, постійних та пересічних глядачів змагань на основі аналізу варіації, моди, показників асиметрії та ексцесу розподілу. Для досягнення цілей дослідження було використано метод експоненційного згладження та метод опорних векторів. SVM є методом машинного навчання, який використовується для вирішення задач класифікації та регресії. Як і для класичної моделі регресії основою підходу є знаходження функції підгонки емпіричних даних. Обрані методи дозволили підготувати дані для аналізу та побудувати регресійні SVM-моделі з ядром на основі радіально-базисних функцій. Побудовані моделі для доходу кіберспорту та пересічних глядачів кіберспорту мають тип ϵ -SVM, а для світової аудиторії кіберспорту та постійних глядачів кіберспорту – ν -SVM. Доведена адекватність побудованих моделей на основі аналізу залишків моделі. Здійснено прогнозування вхідних показників. Визначено, що до 2025 року очікується постійне зростання доходу від кіберспортивної діяльності, що означає постійний розвиток та вдосконалення супутньої до кіберспорту інфраструктури. Визначено важливість та необхідність державної підтримки розвитку кіберспорту на всіх рівнях: від організації турнірних площадок до проведення регіональних, шкільних, аматорських турнірів. Отримані результати можуть бути використані Федерацією кіберспорту України, кіберспортивними організаціями, дослідниками для обґрунтування необхідності розвитку кіберспорту в Україні.

Ключові слова: кіберспорт, кіберспортивна індустрія, машинне навчання, метод опорних векторів, SVM.

O. KUZMENKO, S. MYNENKO, K. GRITSENKO, V. YATSENKO

Sumy State University

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR STATISTICAL ANALYSIS AND FORECASTING OF THE E-SPORTS INDUSTRY

The article considers the dynamics and behavior of the e-sports industry at the global level and the state of e-sports as an industry in Ukraine. The main achievements of the e-sports sphere of Ukraine are determined. The statistical analysis of the income of the e-sports industry, the total audience of e-sports games, regular and average spectators of competitions on the basis of the analysis of variation, fashion, indicators of asymmetry and excess of distribution is carried out. To achieve the objectives of the study, the method of exponential smoothing and the method of reference vectors were used. SVM is a machine learning method used to solve classification and regression problems. As for the classical regression model, the basis of the approach is to find the function of fitting empirical data. The chosen methods allowed to prepare data for analysis and to build regression SVM-models with a kernel on the basis of radial-basis functions. The built models for the income of e-sports and ordinary e-sports spectators are of the ϵ -SVM type, and for the global audience of e-sports and regular e-sports viewers - ν -SVM. The adequacy of the constructed models is proved on the basis of the analysis of model residues. Input indicators are predicted. It is determined that by 2025 the income from e-sports activities is expected to grow steadily, which means the constant development and improvement of the infrastructure related to e-sports. The importance and necessity of state support for the development of e-sports at all levels: from the organization of tournament venues to regional, school, amateur tournaments. The obtained results can be used by the Federation of e-sports of Ukraine, e-sports organizations, researchers to substantiate the need for the development of e-sports in Ukraine.

Keywords: e-sports, e-sports industry, machine learning, reference vector method, SVM.

Постановка проблеми. Останніми роками кіберспортивні змагання акумулюють навколо себе значні суми коштів та численну аудиторію глядачів. Так, за даними Statista [1], тільки за першу половину 2021 року призовий фонд десяти найбільших турнірів склав 48,79 млн. дол. США. Дохід кіберспорту в світі у 2020 р. склав 1,1 млрд дол. США з аудиторією 495 млн. чол. Популярність кіберспорту зумовлює виникнення нових професій, розвиток кіберспортивної інфраструктури, розробку нових ігор, створення навчальних програм. Інфраструктура кіберспорту включає в себе наявність ігор, обладнання, приміщень для тренувань та проведення турнірів, медіа-простір, що включає і стрімінгові сервіси. Необхідна для існування кіберспорту інфраструктура визначається існуванням турнірних майданчиків, які забезпечують як безкоштовні змагання так і з призовим фондом. Прикладом таких майданчиків є The International з гри Dota 2 та Major League Gaming. Український підрозділ мультигеймінгової кіберспортивної організації Natus Vincere з гри Dota 2 став переможцем першого у світі турніру The International а в подальших роках був у топових позиціях рейтингу [2]. У 2017 році була створена Федерація кіберспорту України, а уже у 2020 році кіберспорт був офіційно визнаний і внесений до списку видів спорту. Останніми роками ведеться робота по визнанню кіберспорту олімпійським видом спорту. Масштабність, важливість, швидкий розвиток галузі зумовлює проведення досліджень пов'язаних із кіберспортивною індустрією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вчені України та світу розглядають проблеми кіберспорту з точки зору декількох складових: економіки, спорту, когнітивної науки, інформатики, права, медіа-досліджень та соціології. З точки зору економіки кіберспорт розглядали Н. Лохман, О. Карнашук, О. Корнілова [3], а саме перспективи комерційного успіху кіберспорту, а А. Пей [4] розглянув можливості кіберспорту перерости у мільярдну індустрію. З точки зору когнітивної науки в розрізі впливу на розвиток проблемного геймінгу кіберспорт вивчали Т. Чанг, С. Сам, М. Чан, Е. Лай, Н. Ченг [5], а П. Грей, Дж. Вуонг, Д. Зава, Т. МакХейл [6] вивчали особливості виробітку гормонів під час кіберспортивного змагання. К. Холлман та Т. Гіел [7] розглядали спортивну сторону електронних ігор: фізична активність, відпочинок, елемент змагання та особливості організації ігор. З точки зору інформатики кіберспорт досліджували Г. Нагел [8] – способи аналізу фізіологічних даних зібраних під час гри, С. Лоу-Кем, С. Рейссі, М. Кайтої та Дж. Пей розробили алгоритм машинного навчання для визначення неочікуваних стратегій гри на основі поведінки професійних гравців [9], Дж. Кім, Б. Кіген, С. Парк, А. Ох [10] досліджували підходи зі змішаними методами для аналізу командної роботи гравців.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на широкий інтерес як вітчизняних так і закордонних науковців до теми кіберспорту, статті присвячені загальним тенденціям розвитку кіберспортивної індустрії базуються на експертних оцінках і не містять математично визначеного підґрунтя подальшого розвитку індустрії.

Формулювання цілей статті. Метою статті є статистичний аналіз тенденцій та прогноз розвитку кіберспортивної індустрії за допомогою методів машинного навчання, що дозволить визначити перспективність розвитку кіберспортивної галузі в Україні.

Опис методики проведення дослідження. Для проведення дослідження доцільно використовувати методи машинного навчання. Саме машинне навчання як сфера застосування штучного інтелекту дозволяє автоматично навчати та вдосконалювати модель на основі досвіду, без чіткого програмування. Машинне навчання зосереджується на розробці комп'ютерних програм, які мають доступ до даних та використовують їх для самостійного навчання. Процес навчання починається із наявних даних, таких як спостереження чи інструкції, які дозволяють шукати закономірності в даних та приймати обґрунтовані рішення в майбутньому на основі емпіричних даних, які знаходяться на вході моделі. Основна мета полягає в тому, щоб дозволити комп'ютерам навчатися автоматично без втручання або допомоги людини і відповідно самостійно коригувати дії.

Машина опорних векторів (Supported Vector Machine, SVM) – це керований алгоритм машинного навчання, який використовується як для задач класифікації так і для регресії. Для регресії найчастіше використовується позначення SVR – регресія опорних векторів. Сутність регресії заключається в тому, щоб знайти функцію, яка наближає відображення вхідної області до фактичних даних на основі навчальної вибірки.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів. Інформаційною базою дослідження є дані про Дохід кіберспорту в світі (млн. долл), Світова аудиторія кіберспорту (млн. чол.), Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.), постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.) з 2014 по 2020 рік (таблиця 1).

Таблиця 1

Основні показники кіберспортивної індустрії у світі

Рік	Дохід кіберспорту в світі, млн. долл	Світова аудиторія кіберспорту, млн. чол.	Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.)	Постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.)
2014	194	-	-	-
2015	325	-	-	-
2016	493	281	160	121
2017	655	335	192	143
2018	776	395	222	173
2019	960	443	245	198
2020	1100	495	272	223

Джерело: [11]

На першому етапі дослідження необхідно провести обробку пропущених значень. Для заповнення пропущених значень скористаємось методом експоненційного згладження. Цей метод підходить для прогнозування даних без чіткої тенденції чи сезонності. Прогнози, отримані з використанням методів експоненційного згладжування є середньозваженими показниками минулих спостережень, при цьому ваги зменшуються в геометричній прогресії у міру старіння спостережень. Іншими словами, чим пізніше спостереження, тим вище пов'язаний ваговий коефіцієнт. Ця система швидко і надійно формує надійні прогнози для широкого діапазону часових рядів. Експоненційне згладження проведемо за допомогою інструментарію STATISTICA 10. На рисунку 1 відображені графіки експоненційного згладження відібраних показників.

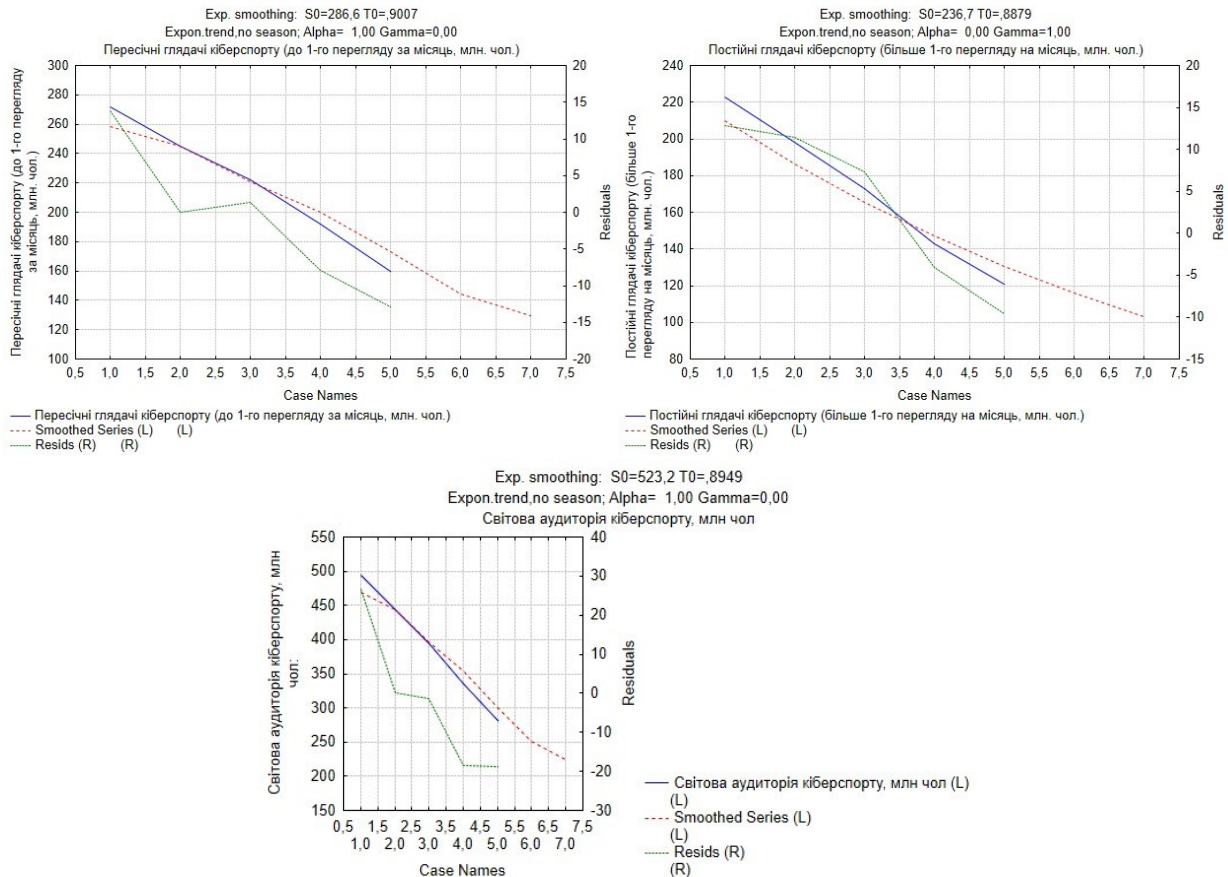


Рис. 1. Експоненційне згладження показників

Джерело: розраховано авторами

Найкращим трендом для згладження обраних показників виявився експоненційний тренд без сезонності. У таблиці 2 приведені результати та кількісні характеристики експоненційного згладження.

Таблиця 2

Кількісні характеристики якості експоненційного згладження

Показник	Світова аудиторія кіберспорту, млн. чол.	Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.)	Постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.)
Середня похибка	-2,4109	-1,1464	3,5931
Середня абсолютна похибка	13,0994	7,2154	9,0647
Сума квадратів	1412,3446	424,5280	458,9709
Середній квадрат	282,4689	84,9056	91,7942
Середня процентна помилка	-1,4378	-1,3097	1,0007
Середні абс. перс. помилка	3,5971	3,5846	5,3150
S0	523,2	286,6	236,7
T0	0,8949	0,9007	0,8879
Прогноз на 2014 рік	225,06	129,81	102,95
Прогноз на 2015 рік	251,48	144,12	115,95

Джерело: складено авторами.

На другому етапі дослідження характеристики кіберспорту проведемо статистичний аналіз вхідних показників. Для цього розрахуємо основні статистичні характеристики (таблиця 3).

Відповідно до таблиці 3, найбільшу волатильність має Дохід кіберспорту в світі, за досліджуваний період він коливався від 194 млн. долл до 1100 млн. долл. Тоді як найменший розкид характерний для показника Постійні глядачі кіберспорту. Це свідчить про стабільність та сформованість аудиторії, яка цікавиться кіберспортом та щонайменше 2 рази на місяць переглядає кіберспортивні змагання. Моди у досліджених даних не спостерігається. Серед досліджених показників лише Дохід кіберспорту в світі є неоднорідним, оскільки коефіцієнт варіації для нього більше 33%, тоді як інші 3 показники характеризуються однорідністю вибірки.

Таблиця 3

Описові статистики вхідних показників

Показник	Дохід кіберспорту в світі, млн. долл	Світова аудиторія кіберспорту, млн. чол	Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.)	Постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.)
Середнє значення	643,286	346,506	194,99	153,843
Медіана	655	335	192	143
Мінімум	194	225,06	129,81	102,95
Максимум	1100	495	272	223
Середньоквадратичне відхилення	329,746	101,584	53,589	45,317
Коефіцієнт варіації	51,26	29,317	27,483	29,457
Коефіцієнт асиметрії	0,02	0,302	0,228	0,504
Коефіцієнт ексцесу	-1,24	-1,474	-1,541	-1,333

Джерело: складено авторами.

Відповідно до значень коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, можна дійти висновку, що для Постійних глядачів асиметрія є сильною і додатною (коефіцієнт асиметрії $>0,5$), тоді як для інших – незначною. Відповідно до коефіцієнту ексцесу – всі показники мають пласку вершину на розподілі.

Переходячи до третього етапу дослідження потрібно визначити особливості побудови SVM-моделей при машинному навчанні. Дані моделі будуються в розрізі чотирьох типів опорних векторів: поліноміальні, лінійні, радіально-базисні функції (RBF) та сигмоподібні. SVM-моделі бувають двох типів: epsilon-SVM та nu-SVM регресії.

У регресійних моделях SVM основною метою є встановлення функціональної залежності між результативною змінною y та факторними змінними x_i . З цього виходить, що залежність між регресором та регресандом можна описати певною функцією $f(x)$ з додаванням певних залишків:

$$y = f(x) + \text{залишки}$$

Тоді завдання полягає в тому, щоб знайти функціональну форму для f , яка може правильно передбачити нові випадки. Щоб реалізувати побудову адекватних моделей передбачається формування навчальної вибірки та запуск процесу послідовної оптимізації функції помилки. В залежності від визначення цієї функції помилки можна розпізнати два типи моделей SVM:

Регресійний SVM 1-го типу. Для цього типу SVM модель набуває наступного вигляду:

$$\frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N \xi_i + C \sum_{i=1}^N \xi_i^* \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} w^T \phi(x_i) + b_i - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ y_i - w^T \phi(x_i) - b_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{cases}$$

де C – параметр місткості (використовується для перехресної перевірки сітки);

Регресійний SVM 2-го типу. Для цього типу SVM модель набуває наступного вигляду:

$$\frac{1}{2} w^T w - C \left(v\varepsilon + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \right) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} w^T \phi(x_i) + b_i - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ y_i - w^T \phi(x_i) - b_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, N, \varepsilon \geq 0 \end{cases}$$

Модуль SVM програми Statistica 10 підтримує ряд ядер для використання в SVM. До них відносяться лінійні, поліноміальні, радіально-базисні функції (RBF) та сигмоподібні:

$$\phi = \begin{cases} x_i \cdot x_j & \text{Linear} \\ (\gamma x_i \cdot x_j + k)^d & \text{Polynomial} \\ \exp(-\gamma(x_i - x_j)^2) & \text{RBF} \\ \tanh(\gamma x_i \cdot x_j + k) & \text{Sigmoid} \end{cases}$$

де d – ступінь поліноміального ядра;
 γ – гамма-параметр поліноміального, радіально-базисного та сигмоїдного ядра;
 k – коефіцієнт поліноміального та сигмоїдного ядер.

Отже, потрібно побудувати SVM-моделі машинного навчання: двох типів в розрізі чотирьох специфікацій опорних векторів за допомогою модуля SVM програми Statistica для кожного з показників.

Таблиця 4

Порівняння побудованих SVM-моделей

Специфікація опорного вектору	Дохід кіберспорту в світі, млн. долл	Світова аудиторія кіберспорту, млн чол	Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.)	Постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.)
Лінійна першого типу	25,62	9	2,5	7,5
Поліноміальна першого типу	166,85	43	25	18,5
Радіально-базисна функція першого типу	7,885	4	1	3
Сигмоїд першого типу	111,14	39	18	23
Лінійна другого типу	19,5	9	3	7
Поліноміальна другого типу	140,77	42,5	24,5	17
Радіально-базисна функція другого типу	16,14	2	2,5	2
Сигмоїд першого типу	76,59	37	18	19

Джерело: складено авторами.

Порівняння побудованих моделей відбувається на основі їх залишків. Чим залишки менші – тим модель краща. Відповідно до таблиці 4 для показника Дохід кіберспорту в світі найкращою є модель на основі радіально-базисної функції першого типу, для показника Світова аудиторія кіберспорту – модель на основі радіально-базисної функції але другого типу, для показника Пересічні глядачі кіберспорту – радіально-базисна функція першого типу і для показника Постійні глядачі кіберспорту – радіально-базисна функція другого типу. Приведемо детальний опис цих функцій у таблиці 5.

Таблиця 5

Специфікація моделей SVM з ваговими коефіцієнтами

Специфікація опорного вектору	Дохід кіберспорту в світі, млн. долл	Світова аудиторія кіберспорту, млн чол	Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.)	Постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.)
Тип	SVM: Regression type 1 (C=10,epsilon=0,1) Kernel: Radial Basis Function (gamma=1) Number of Support Vectors: 2 (0 bounded)	SVM: Regression type 2 (C=10,nu=0,5) Kernel: Radial Basis Function (gamma=1) Number of Support Vectors: 5 (0 bounded)	SVM: Regression type 1 (C=10,epsilon=0,1) Kernel: Radial Basis Function (gamma=1) Number of Support Vectors: 3 (0 bounded)	SVM: Regression type 2 (C=10,nu=0,5) Kernel: Radial Basis Function (gamma=1) Number of Support Vectors: 4 (0 bounded)
Weight SV 1	-1,42378	-2,98681	-0,60538	-4,06415
Weight SV 2	1,42378	8,25687	-1,16807	9,71562
Weight SV 3	-	-9,51319	1,77345	-8,43585
Weight SV 4	-	2,97802	-	2,78438
Weight SV 5	-	1,26511	-	-

Джерело: складено авторами

У таблиці 5 відповідно розміщена інформація про тип SVM для кожного з показників, коефіцієнти C, epsilon, nu, gamma для відповідних типів регресій, позначення специфікації ядра (у вигляді RBF для всіх чотирьох показників), кількість векторів та вагові коефіцієнти векторів (Weight SV 1).

Для перевірки адекватності побудованих моделей потрібно розрахувати підсумкові характеристики регресії. Дані показники приведені у таблиці 6.

Таблиця 6

Перевірка адекватності побудованих моделей

Специфікація опорного вектору	Дохід кіберспорту в світі, млн. долл	Світова аудиторія кіберспорту, млн чол	Пересічні глядачі кіберспорту (до 1-го перегляду за місяць, млн. чол.)	Постійні глядачі кіберспорту (більше 1-го перегляду на місяць, млн. чол.)
1	2	3	4	5
Observed mean	807,5000	389,0000	218,5000	170,5000
Predictions mean	799,6173	390,5249	218,0502	170,1100

1	2	3	4	5
Observed S.D.	215,6676	76,3675	37,4767	38,8909
Predictions S.D.	215,8335	79,1285	37,1634	35,8988
Sum of squared error	62,1500	6,1366	0,2514	4,6283
Error mean	7,8827	-1,5249	0,4498	0,3900
Error S.D.	0,1659	2,7610	0,3132	2,9921
Abs. error mean	7,8827	1,9523	0,4498	2,1157
S.D. ratio	0,0008	0,0362	0,0084	0,0769
Correlation	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Джерело: складено авторами

Відповідно до таблиці 6, абсолютне значення похибки (Abs. error mean) всіх чотирьох показників є незначним. Значення відношень стандартних відхилень (S.D. ratio) прямує до 0, що свідчить про низьку волатильність і розкид даних від середнього в порівнянні з минулим.

Проведемо прогнозування показників розвитку кіберспортивної індустрії до 2025 року.



Рис. 2. Фактичні та прогнозовані значення показників кіберспортивної індустрії

Джерело: складено авторами.

Згідно рисунку 2, очікується, що до 2025 року всі показники кіберспортивної індустрії будуть зростати. При тому, що темп зростання доходу кіберспорту в світі більший за приріст світової аудиторії, що свідчить про майбутні зміни не тільки у кількісній але і у якісній стороні індустрії. Очікується, що у 2025 році дохід від кіберспорту буде сягати 1,8 млрд долл США, світова аудиторія кіберспорту буде налічувати 784 млн чоловік, при чому постійних глядачів кіберспорту буде 323 млн чоловік.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямку. Проведене моделювання та розраховані показники підтвердили перспективність кіберспортивної індустрії. Українські гравці та команди є відомими учасниками та переможцями кіберспортивних турнірів. Україні, щоб не залишитись на периферії світових трендів потрібно розвивати кіберспорт на всіх рівнях. Спрогнозовані показники до 2025 року підтверджують зростання масштабів індустрії, а можливість проводити змагання по мережі інтернет прискорить інтеграцію та визнання України на міжнародній арені. Перспективою подальших досліджень виступає визначення пріоритетних для розвитку ігор, визначення їх впливу, залучення спортсменів та аудиторії до турнірів.

References

1. Leading eSports games worldwide in 1st half 2021, by cumulative tournament prize pool: Statista Inc. <https://www.statista.com/statistics/501853/leading-esports-games-worldwide-total-prize-pool/>.
2. NaVi: Natus Vincere official web page. <https://navi.gg/>.
3. Lokhman, N., Karashchuk, O., Kornilova, O. (2018). Analysis of esports as a commercial activity. Problems and Perspectives in Management, 16, 207–213. [https://doi.org/10.21511/ppm.16\(1\).2018.20](https://doi.org/10.21511/ppm.16(1).2018.20).
4. Pei A. (2019). Here's why esports can become a billion-dollar industry in 2019. CNBC. <https://www.cnbc.com/2019/01/20/heres-why-esports-can-become-a-billion-dollar-industry-in-2019.html>
5. Chung, T., Sum, S., Chan, M., Lai, E., & Cheng, N. (2019). Will esports result in a higher prevalence of problematic gaming? A review of the global situation. Journal of behavioral addictions, 8(3), 384–394. <https://doi.org/10.1556/2006.8.2019.46>
6. Gray, P. B., Vuong, J., Zava, D., McHale, T. (2018). Testing Men's Hormone Responses to Playing League of Legends: No Changes in Testosterone, Cortisol, DHEA or Androstenedione but Decreases in Aldosterone. Computers in Human Behavior, 83, 230-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2018.02.004>

-
7. Hallmann, K. & Giel, T., (2018). eSports – Competitive sports or recreational activity?. Sport Management Review, Elsevier, vol. 21(1), pages 14-20. <https://ideas.repec.org/a/eee/spomar/v21y2018i1p14-20.html>
 8. Nagel G. (2017). Use of eye tracking for eSports analytics in a MOBA game (Master's thesis). University of Bergen, Norway. <http://bora.uib.no/handle/1956/15875>
 9. Low-Kam, C., Raïssi, C., Kaytoue, M., Pei, J. (2013). Mining statistically significant sequential patterns. 2013 IEEE 13th International Conference on Data Mining. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2013.124>
 10. Kim, J., Keegan, B. C., Park, S., Oh, A. (2016). The proficiency-congruency dilemma: Virtual team design and performance in multiplayer online games. CHI'16 Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 4351–4365. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858464>
 11. Esports Earnings. <https://www.esportsearnings.com/history/2015/countries>

УДК 004.891

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-19

ДЖУЛІЙ В. М., ЧЕШУН В. М.
Хмельницький національний університет
ДЖУЛІЙ А. В., ЧОРНЕНЬКИЙ В. І.
Університет економіки і підприємництва

ІМОВІРНІСНІ АЛГОРИТМИ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ІР-ТЕЛЕФОНІЇ

Результати проведеного аналізу та дослідження надають можливість вказати, що найбільш відомі ІР-протоколи розподілу загальної секретної інформації необхідно вдосконалювати в двох напрямках: підвищення інформаційної безпеки ІР-телефонії та покращення основних показників ІР-протоколів Інтернет мереж.

Одним з методів забезпечення підвищення безпеки ІР-протоколу формування загальної секретної інформації є відстеження і заборона виконання атаки типу «зустріч по середині» за рахунок використання в мережах ІР-телефонії декількох паралельних незалежних каналів сеансів зв'язку.

Розглянуто актуальне завдання підвищення захищеності ІР-телефонії та безпеки програмного розподілу загальної секретної інформації, що відрізняється від існуючого методу виявлення нелегітимного абонента впровадженням автоматизованої програмно-апаратної перевірки коду автентифікації. При використанні в даному випадку декілька каналів зв'язку, відповідна перевірка надає можливість виявити нелегітимного абонента.

Ключові слова: імовірнісні алгоритми, нелегітимний кореспондент, інформаційна взаємодія, інтернет-телефонія, криптографічний захист, канали зв'язку.

V. DZHULIY, V. CHESHUN
Khmelnytskyi National University
A. DZHULIY, V. CHORNENKIY
University of Economics and Entrepreneurship

PROBABILITY ALGORITHMS AND METHODS OF IP-TELEPHONY SECURITY

The urgent task of increasing the security of IP-telephony and security of software distribution of general classified information, which differs from the existing method of identifying an illegitimate subscriber, the introduction of automated software and hardware verification of the authentication line. When using in this case several communication channels, the corresponding check will give the chance to reveal the illegitimate subscriber. The results of the analysis and research provide an opportunity to indicate that the most well-known IP protocols for the distribution of general classified information need to be improved in two ways: improving the information security of IP - telephony and improving the basic indicators of IP protocols of Internet networks.

The Diffie-Hellman algorithm solves the following problems: provides an opportunity to identify an active illegitimate correspondent who uses voice synthesis software; to identify an active illegitimate IP correspondent - protocols in Internet telephony communication channels in the absence of previously distributed secret key information between correspondents, a trusted center. The method can be used in the evaluation of methods for monitoring the level of security of data packet-switched data in Internet telephony, which will provide the reliability of IP telephony and increase security.

One of the methods to increase the security of the IP protocol for the formation of general classified information is to monitor and prohibit an attack such as a "meeting in the middle" through the use of Internet IP telephony networks of several parallel independent communication channels. IP - a protocol with software verification of the authentication line of IP telephony does not provide an opportunity to determine which communication channel the illegitimate subscriber will perform active attacks. Also, the detection of an illegitimate subscriber in the communication channel is possible only after the successful completion of the protocol, the illegitimate subscriber can not be detected during the operation of the protocol.

Keywords: probabilistic algorithms, illegitimate correspondent, information interaction, Internet telephony, cryptographic protection, communication channels.

Вступ. Забезпечення підвищення ефективності та безпеки всіх галузей виробництва на сьогодні є однією з ключових проблем, тому актуальною є необхідність впровадження і розвитку сучасних інформаційних технологій. Поширення ІР-телефонії через Інтернет мережі поставило під загрозу прибутки операторів телефонних мереж [1]. Проте, оператори AT&T, British Telecommunications, Deutsche Telecom, починаючи надавати послуги ІР-телефонії.

Перевагою Інтернет-телефонії є низька вартість міжміських і міжнародних переговорів, вона дозволяє зменшити витрати на послуги передачі факсів і мультимедіа зв'язку за рахунок шифрування і стиснення голосового потоку [2, 3]. Інтернет-телефонія не використовує дороге устаткування на шляху передачі інформації пакетів з голосовим сигналом [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток нових ІР-протоколів Інтернет мереж, а також передача потоку пакетних даних у вигляді голосових пакетів у відкритому вигляді через публічні мережі призвели до необхідності стандартизації ІР-протоколів Інтернет мереж, а також криптографічного захисту даних для забезпечення безпечної Інтернет-телефонії [5, 6]. В результаті проведених заходів ІР-протоколи Інтернет мереж розділені, у відповідності до вирішуваних задач, на три групи: протоколи забезпечення

захищеності і сигналізації, криптографічний захист пакетного потоку даних (медіа трафіку) і програмний розподіл ключів сучасними криптографічними алгоритмами генерації загальних ключів для медіа трафіку [7].

Стандартизація протоколів, а також масове використання персональних комп'ютерів операторами IP-телефонії в якості терміналів, призвели до розробки спеціалізованого програмного забезпечення для IP-телефонії, а також до доступного програмного забезпечення (з відкритим кодом), що дало поштовх розширювати можливості IP-телефонії і використовувати криптографічні алгоритми та алгоритми розподілу ключів для забезпечення надійності в Інтернет-телефонії.

Для розподілу секретної інформації між кореспондентами IP-телефонії на даному етапі використовуються алгоритми асиметричного шифрування [8, 9, 10, 11]. До переваг використання алгоритмів асиметричного шифрування можна віднести розподіл секретної інформації між кореспондентами IP-телефонії. Недоліком є те що вони досить повільні, мають відносно велику довжину ключа, є не придатними для шифрування великих об'ємів інформації. Область їх застосування - розподіл секретної інформації між кореспондентами IP-телефонії, формування цифрового підпису.

Запропонований У.Діффі і М.Хеллманом принципово новий підхід організації секретного зв'язку, шифрування з відкритим ключем, без попереднього обміну ключами. Для шифрування і дешифрування потоку даних використовуються різні ключі, при цьому доступ до одного ключа не надає практичної гарантії обчислити інший [12, 13].

Постановка задачі. Проведений аналіз наукових досліджень технологій IP-телефонії в областях криптографічного захисту передачі інформації, забезпечення якості потоку даних з пакетною комутацією, надання якісних послуг IP-телефонії, архівація відео і голосової інформації, показав, що на сьогодні питання безпечної Інтернет-телефонії є відкритим для сценарію точка-точка у випадку не вироблення заздалегідь загального секретного ключа для операторів [14]. До загального недоліку розглянутих робіт слід віднести що в них, не описується така поширена атака на протоколи програмного розподілу ключів, як "зустріч посередині", тому виникає необхідність в розробці методу та алгоритму забезпечення безпеки IP-телефонії, які будуть враховувати атаку типу "зустріч посередині".

Виклад основного матеріалу. Асиметричний алгоритм Діффі-Хелмана обміну секретною інформацією може бути успішно атакованим активним нелегітимним абонентом. Тому, при роботі протоколу Діффі-Хелмана під час обміну секретною інформацією, необхідно забезпечити закритість та достовірність голосової інформації в каналах зв'язку. Доцільно протокол Діффі-Хелмана використовувати в захищених каналах передачі голосової інформації, в яких унеможливується несанкціонований доступ до голосової інформації та її модифікація чи підміна.

У разі необхідності в мережі IP-телефонії встановлення захищеного з'єднання проти атак типу «зустріч по середині» між двома кореспондентами учасниками сесії, в даному випадку можлива ситуація, коли вони, можуть не мати загальних сертифікатів (загальний довірений центр) або протоколів секретною інформацією, а також при цьому можуть не мати загального захищеного каналу для встановлення зв'язку між собою.

У випадку наявності у кореспондентів сесії зв'язку IP-телефонії сертифікатів, різних центрів сертифікації, неможливо в даній ситуації перевірити достовірність кожного сертифікату, так як кожен з учасників сесії може не довіряти кореспондентам, центру сертифікації іншого абонента. Для встановлення захищеного з'єднання між абонентами учасниками сесії IP-телефонії виникає необхідність генерації та розподілу загальної секретної інформації (ключів) для реалізації з'єднання. Абоненти в даній ситуації можуть використовувати алгоритми симетричного або асиметричного шифрування. Недоліком алгоритмів симетричного шифрування є необхідність передачі секретного ключа відкритими каналами зв'язку. В нелегітимного абонента з'являється цілком вірогідна можливість перехоплення секретної інформації, що дозволяє абоненту провести дешифрування переданих потоків даних в процесі сеансу зв'язку. Таким чином голосова інформація IP-телефонії буде доступна нелегітимному абоненту. При використанні алгоритмів асиметричного шифрування в разі передачі ключової інформації відкритими каналами зв'язку передана інформація не буде прочитана нелегітимним абонентом у випадку перехоплення переданого потоку даних IP-телефонії. Однак, у випадку використання асиметричного алгоритму шифрування при обміні відкритими (не секретними) ключами, які використовуються для організації захищеного з'єднання IP-телефонії, у абонентів учасників зв'язку не буде можливості переконатися, що несекретний ключ передається між ними без модифікації нелегітимним абонентом, як показано на рис. 1. Також до недоліків алгоритмів асиметричного шифрування слід віднести те, що відкритий і секретний ключі мають відносно великий розмір, що утрудняє їх передачу по Інтернет мережі між абонентами зв'язку.

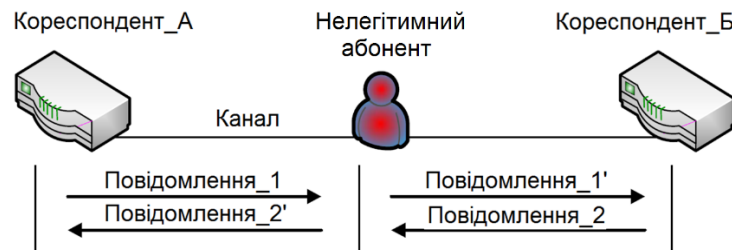


Рис. 1. Застосування атаки «зустріч по середині» при використанні асиметричного шифрування

Для підвищення безпеки генерації та обміну загальної секретної інформації пропонується використовувати наступні шляхи: підвищення безпеки передачі інформації за рахунок програмної перевірки автентифікаційного рядка абонентів з використанням ще одного каналу зв'язку; а також використання сесії IP-телефонії декількох каналів зв'язку для виконання IP-протоколу розподілу загальної секретної інформації між абонентами сесії.

Захист від нелегітимного абонента в режимі використання сценарію клієнт-клієнт виконується за рахунок програмної перевірки автентифікаційного рядка абонентів з використанням ще одного каналу зв'язку, при цьому автентифікаційний рядок передається по голосовому каналу IP-телефонії в ручному режимі. Голосовий канал IP-телефонії в цьому випадку між абонентами сесії є додатковим каналом зв'язку Інтернет мережі, який діє паралельно по відношенню до каналу IP-телефонії. Виникає необхідність в автоматизації процесу перевірки короткого автентифікаційного рядка. Існуючий метод не забезпечує необхідного рівня захищеності і не є безпечним, так як використовується в даному випадку один канал зв'язку між учасниками сесії IP-телефонії, а використовуванні на сучасному етапі засоби аналізу і синтезу голосової інформації дозволяють виконувати програмне вирізування відповідної інформації з потоку даних та подальшою заміною на відповідну інформацію, синтезовану нелегітимним абонентом.

Проведений аналіз та практичне дослідження показало, що існує висока ймовірність наявності між абонентами сеансу зв'язку, незалежних пересічних каналів зв'язку. Таким чином, в основі запропонованих протоколів IP-телефонії використана перевага легітимних абонентів по відношенню до нелегітимних, яка полягає в тому, що тільки легітимні абоненти учасники сесії мають доступ до отримання голосової інформації з двох і більше каналів потоку даних IP-телефонії одночасно, при цьому маючи в своєму розпорядженні інформацію про IP-адреси абонентів, яка не є секретною також і для нелегітимних абонентів. Необхідно підкреслити, що запропонований метод модернізації протоколів IP-телефонії розподілу загальної секретної інформації між абонентами сесії пропонується для підвищення захищеності, але даний протокол IP-телефонії не гарантує 100% достовірності. В якості оцінки модернізації протоколів IP-телефонії використовуються наступні критерії величин ймовірностей: ймовірність успішної активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині» $P_{УА_ЗС}$; ймовірність виявлення активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині» $P_{ВА_ЗС}$; ймовірність успішного розподілу та генерації загального секретного ключа $P_{У_СК}$.

Протокол IP-телефонії ZRTP (криптографічний протокол узгодження ключів шифрування, використовуваний у системах передачі голосу по IP мережах) має в своєму розпорядженні механізм захисту активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині», виражений у вербальній перевірці короткого автентифікаційного рядка по голосовому каналу між абонентами сесії IP-телефонії. В даному випадку після успішного виконання протоколу IP-телефонії ZRTP і встановлення голосового каналу між абонентами сесії в топології типу клієнт-клієнт без сервера, абоненти отримують відповідне значення короткого автентифікаційного рядка - що представляє собою комбінацію символів обчислений-отриманий спеціалізованим алгоритмом. Один з абонентів учасників сесії вимовляє короткий автентифікаційний рядок голосовим каналом зв'язку IP-телефонії. Інший абонент який є також учасником сесії, звіряє короткий автентифікаційний рядок на своєму VoIP-моніторі зі значенням, отриманим по голосовому каналу. Якщо автентифікаційні рядки співпадають, це означає, що в даному випадку відсутня активна атака нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині», але може мати місце активна атака з підробкою автентифікаційного рядка голосовим каналом зв'язку. Якщо автентифікаційні рядки не співпадають - має місце активна атака нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині» в каналі передачі потоку даних. Таким чином, під час з'єднання двох абонентів учасників сесії без участі сервера автентифікація буде виконуватися за рахунок знання абонентом голосових характеристик іншого абонента учасника зв'язку, а також за рахунок немодифікованої передачі потоку даних по двох каналах зв'язку - голосовим каналом SRTP і каналом передачі даних.

Використанням сучасного програмно-апаратного забезпечення та відповідних технологій достатньо просто виконати синтез голосової інформації і аналіз голосу абонентів. Також виникає необхідність в розгляді наступних варіантів: абонентам відомі характеристики голосу один одного; другий варіант абонентам не відомі характеристики голосу. У випадку першого варіанта, при встановленні з'єднання

викликаючий абонент, передає голосовою інформацією привітання, а також ім'я іншого абонента викликаючої сторони. Після прийняття голосової інформації виконується вербальна перевірка автентифікаційного рядка. Переданої голосової інформації може бути достатньо для синтезу голосової інформації абонента для підміни одного набору символів на інші з метою модифікації автентифікаційного рядка в голосовому каналі. В цьому випадку перевірка автентифікаційного рядка пройде успішно навіть при наявності активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині» (рис. 2).

При використанні другого варіанту у випадку, коли абоненти не знають відповідних характеристик голосу один одного, не потрібно накопичення переданої голосової інформації даних, так як синтез в даному випадку можна виконувати маючи в своєму розпорядженні інформацію з використання будь-якого голосу. Таким чином, як модернізація протоколу IP-телефонії ZRTP пропонується впровадження автоматизованої програмно-апаратної перевірки автентифікаційного рядка. При використанні декількох каналів зв'язку, відповідна перевірка надасть можливість виявити нелегітимного абонента.

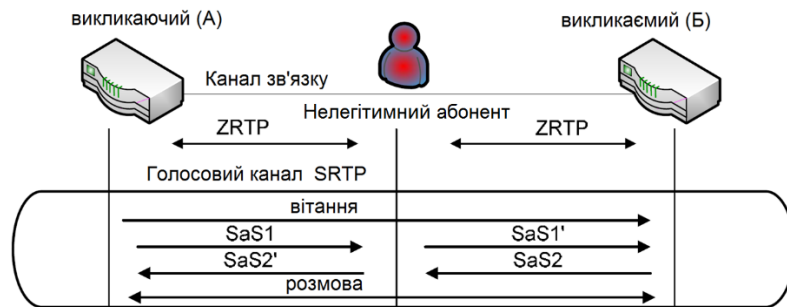


Рис. 2. Підміна автентифікаційного рядка в голосовому каналі зв'язку IP-телефонії

Інформація про IP-адресу, яка необхідна для організації захищеного каналу сесії, може бути отримана абонентами наступним чином: по телефону, при особистій зустрічі, по електронній пошті, іншими доступними засобами зв'язку. Інформація про IP-адресу не є секретною для нелегітимного абонента і може бути передана відкритими каналами зв'язку, на відміну від IP-адрес, загальна секретна інформація для алгоритмів симетричного шифрування є закритою і доступ до неї призведе для нелегітимного абонента до дешифрування потоку даних IP-телефонії. При перехопленні нелегітимним абонентом секретного симетричного ключа шифрування нелегітимний абонент може відправляти дані легітимному абоненту, як і легітимний абонент. В даному випадку для підвищення захищеності даних як додатковий параметр можна використати IP-адреси для підвищення безпеки IP-телефонії, а також можливість отримання потоків даних, які були відправлені по декількох каналах зв'язку легітимними абонентами при відсутності в даному випадку активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині» в декількох каналах зв'язку. Даний підхід для підвищення безпеки IP-телефонії протоколом ZRTP вимагає передачі повідомлення від учасників сеансу іншим каналом зв'язку.

Перевагою підвищення безпеки потоку даних у вигляді програмної автоматизованої перевірки ідентифікаційного рядка є невисока складність розробки та реалізації програмними засобами IP-протоколу. Аутентифікаційний рядок передається в спеціалізоване програмне забезпечення за результатом виконання IP-протоколу ZRTP. В даному випадку достатньо передати автентифікаційний рядок абоненту по додатковому каналу зв'язку для виконання програмної автоматичної перевірки. Недолік – виявлення нелегітимного абонента в каналі зв'язку можливе тільки після успішного завершення роботи протоколу, а не під час його виконання.

Для підвищення безпеки IP-телефонії необхідно оцінити можливості застосування двох і більше каналів зв'язку. Для вирішення даної задачі необхідно: оцінити ймовірність наявності в маршруті загальної точки декількох каналів зв'язку (при цьому необхідно розглянути варіанти використання різних операторів зв'язку між абонентами сесії); розробити алгоритм прийняття рішення про наявність в мережі нелегітимного абонента і оцінити ймовірності правильності прийняття можливих рішень. Для вирішення поставлених задач використаємо наступний алгоритм програмної перевірки автентифікаційного рядка та виявлення активного нелегітимного абонента, який працює в одному з двох каналів зв'язку.

Алгоритм 1 Виявлення активного нелегітимного абонента, який працює в одному з двох каналів зв'язку:

1. Учасники сесії A і B виконують обмін інформацією про IP-адреси: IP_{A1} , IP_{A2} , IP_{B1} , IP_{B2} , а також налаштовують відповідним чином таблицю маршрутизації.
2. Для організації захищеного з'єднання IP-телефонії, учасники сесії абоненти A і B, виконують IP-протокол ZRTP, використовують при цьому канал зв'язку $IP_{A1}-IP_{B1}$. Результатом роботи протоколу ZRTP є отримання автентифікаційного рядка (рис. 3).
3. Абонент A відправляє свій автентифікаційний рядок SAS_A каналом зв'язку $IP_{A2}-IP_{B2}$ абоненту B.

Абонент B отримує автентифікаційний рядок SAS_A' .

4. Абонент B відправляє свій автентифікаційний рядок SAS_B каналом зв'язку IP_{A2} – IP_{B2} абоненту A . Абонент A отримує SAS_B' .

5. Абонент B виконує перевірку автентифікаційних рядків SAS_A і SAS_B .

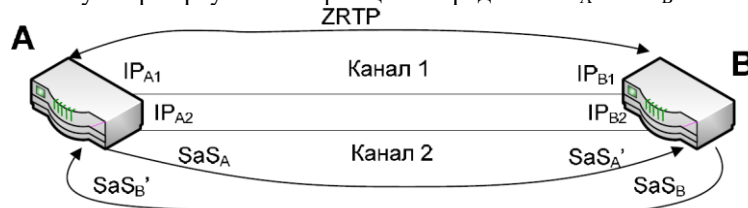


Рис. 3. Механізм програмної перевірки автентифікаційного рядка

6. Якщо автентифікаційні рядки співпадають, то можна зробити висновок, що в мережі відсутній активний нелегітимний абонент в каналах зв'язку, або, що вірогідно також, присутній активний нелегітимний абонент одночасно в обох каналах зв'язку.

7. Якщо значення автентифікаційних рядків не співпадають, абонент B отримує повідомлення від VoIP-монітора IP- телефонії про наявність нелегітимного абонента в каналі зв'язку.

8. Абонент A виконує перевірку на співпадання автентифікаційних рядків SAS_A і SAS_B' . Якщо вони співпадають, то можна зробити висновок, що в мережі відсутній активний нелегітимний абонент в каналах зв'язку, або, що вірогідно також, присутній активний нелегітимний абонент одночасно в обох каналах зв'язку.

9. Якщо значення автентифікаційних рядків не співпадають, абонент A отримує повідомлення від VoIP-монітора IP-телефонії про наявність нелегітимного абонента в каналі зв'язку. Таким чином, використання даного протоколу надає нам інформацію про наявність активного нелегітимного абонента, який в стані провести активну атаку в одному з двох каналів зв'язку.

На основі приведенного алгоритму виконується обчислення ймовірностей: P_{YA_3C} - ймовірність успішної активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині»; P_{BA_3C} - ймовірність виявлення активної атаки нелегітимним абонентом типу «зустріч по середині»; P_{Y_CK} - ймовірність успішного розподілу та генерації загального секретного ключа.

Якщо нелегітимний абонент реалізував активну атаку типу «зустріч по середині», виконавши обмін загальною секретною інформацією між абонентами при використанні в даному випадку декілька каналів зв'язку, при цьому не виявивши себе при проведенні активної атаки, атака називається успішною. Така ситуація можливо в тому випадку, якщо один і той же нелегітимний абонент може контролювати потоки даних використовуваних каналів зв'язку і при цьому виконувати синхронну модифікацію потоків даних в кожному з каналів зв'язку.

Ймовірність виконання успішної атаки типу «зустріч по середині» для протоколу з програмною перевіркою коду автентифікації відповідає ймовірності події, що нелегітимний абонент зможе одночасно прослуховувати і виконувати синхронну модифікацію потоків даних в кожному з каналів зв'язку. Виявлення нелегітимного абонента дозволяє абонентам визначити, що існує вірогідність генерації компрометуючого секретного ключа, який дозволить нелегітимному абоненту дешифрувати і прослуховувати передану по каналам зв'язку інформацію, а також виконувати синхронну модифікацію потоків даних в кожному з каналів зв'язку. IP-протокол з програмною перевіркою автентифікаційного рядка IP-телефонії не надає можливості визначити, на який саме канал зв'язку нелегітимний абонент буде виконувати активну атаку. Також виявлення нелегітимного абонента в каналі зв'язку можливе тільки після успішного повного завершення роботи протоколу, нелегітимний абонент не може бути виявленим протягом роботи протоколу. Таким чином, виникає необхідність розгляду додаткових варіантів модифікації IP-протоколу IP-телефонії Z RTP, із врахуванням наведених недоліків.

Висновки. Запропоновано метод підвищення захищеності IP-телефонії та безпеки програмного розподілу загальної секретної інформації, що відрізняється від існуючого методу виявлення нелегітимного абонента впровадженням автоматизованої програмно-апаратної перевірки автентифікаційного рядка. При використанні в цій ситуації декількох каналів зв'язку відповідна перевірка надає можливість виявити нелегітимного абонента.

IP-протокол з програмною перевіркою автентифікаційного рядка IP- телефонії не надає можливості визначити, на який саме канал зв'язку нелегітимний абонент буде виконувати активну атаку. Також виявлення нелегітимного абонента в каналі зв'язку можливе тільки після успішного повного завершення роботи протоколу, нелегітимний абонент не може бути виявленим протягом роботи протоколу. Таким чином, виникає необхідність розгляду додаткових варіантів модифікації IP-протоколу IP-телефонії Z RTP із врахуванням наведених недоліків.

References

1. José Estrada, Mayra Calva, Ana Rodríguez, Christian Tipantúña. Security of IP Telephony in Ecuador: Online Analysis. *Enfoque UTE*, V.7-N.2, Jun.2016, P.25-40.
2. Cherkasov D. Osnovy tekhnologii VoIP ta IP-telefonii / Dmytro Cherkasov // *Telekom voennaia sviaz*. – 2017. – №2. S. 98-104.
3. VOIP security and best practices : For SIP Trunking and Branch Offices Applications. Sangoma Technologies, 2018. 54 r.
4. Hulechko M. S. Analiz potochnoho stanu dii v oblasti zakhyschenoi IP- telefonii / M. S. Hulechko, V. M. Dzhulii, V. Yu. Titova // *Zbirnyk naukovykh prats molodykh naukovtsiv i studentiv «Intelektualnyi potentsial – 2020»*. – Khmelnytskyi : PVNZ UEP, 2020. – Ch. 2. – S. 35–39.
5. Lytvynov V.V. Suchasnyi stan zakhystu informatsii v IR-telefonii / V.V. Lytvynov, V.V. Kazymyr, Ye.V. Ryndych // *Matematychni mashyny i systemy*. –2009. – № 2. – S. 76-84.
6. Filip Rezac; Jan Rozhon; Jakub Safarik; Miroslav Voznak; Zuzana Bajakova. Analysis of the IP telephony security issues using automatic neural network classifier. Published in: 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Publisher: IEEE, 2016. R. 75-84.
7. Olifer, V.G. Bezopasnost kompyuternykh setej / V. G. Olifer, N. A. Olifer. - M. : Goryachaya liniya-Telekom, 2017. - 644 s.
8. Cisco IP Phone 7800 and 8800 Series Security Overview. Cisco public, 2017. 10 p.
9. Hazem El M Bakry, Ali Taki El E Deen and Ahmed Hussein El Tengy. Implementation of an Encryption Scheme for Voice Calls. *International Journal of Computer Applications* 144(2), June 2016. P. 1-4.
10. Kochubinskyi A. Alhorytm vstanovlennia spilnoho sekretnoho znachennia, shcho gruntuietsia na eliptychnykh kryvykh / Anatolii Kochubinskyi, Volodymyr Syniavskyi, Oleksandr Shatalov. // *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennia systemy zakhystu informatsii v Ukraini*. – 2014. –Vyp. 2 (28). – S. 54-64.
11. Zastosuvannia nerozkryvnykh shyfriv dlia ubezpechennia VOIP-telefonii / N.I. Alishov, S.V. Zinchenko, A.N. Alishov, N.O. Sapunova // *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. – 2017. – Vypusk 1(41). – S. 3-7.
12. Osnovy programmno-apparatnoj zashity informacii. / M. A. Borisov, I. V. Zavodcev, I. V. Chizhov. – M.: URSS: Librokom, 2013. – 370 s.
13. Shangin, V. F. Informacionnaya bezopasnost i zashita informacii / V.F. Shangin. - M. : DMK Press, 2017. - 702 s.
14. Dzhulii, V.M. Model nelehitymnogo abonenta zabezpechennia bezpeky IP-telefonii / O.S. Androshchuk, V.M. Dzhulii, Yu.P. Klots, I.V. Muliar // *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. – Khmelnytskyi, 2020. – №2. – Pp. 38–45.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе



Підп. до друку 27.05.2021. Ум. друк. арк. – 14,49. Обл.-вид. арк. – 13,72.
Формат 30×42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № 162/21

Тиражування здійснено з оригінал-макета редакційно-видавничим відділом
Хмельницького національного університету.
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1, тел. (0382) 77-33-63.
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.