ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

4.2019

# ВІСНИК

# Хмельницького національного університету

## Технічні науки

## Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2019, Issue 4, Volume 275

Хмельницький

# ВІСНИК
# ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
# серія: Технічні науки

Затверджений як фахове видання (перереєстрація)
Наказ МОН 04.07.2014 №793

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

**Хмельницький, 2019, № 4 (275)**

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

Включено до науково-метричних баз:

| | |
|---|---|
| **Google Scholar** | http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAJ |
| **Index Copernicus** | http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3 |
| **РИНЦ** | http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650 |
| **Polish Scholarly Bibliography** | https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221 |



| | |
|---|---|
| **Головний редактор** | **Скиба М. Є.**, д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Хмельницького національного університету |
| **Заступник головного редактора** | **Синюк О. М.**, д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету |
| **Голова редакційної колегії серії "Технічні науки"** | **Бойко Ю.М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету |
| **Відповідальний секретар** | **Гуляєва В. О.**, завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету |

**Ч л е н и р е д к о л е г і ї**

*Технічні науки*

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

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



**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 12 від 26.06.2019 р.**



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

☎ (038-2) 67-51-08 **web:** http://journals.khnu.km.ua/vestnik
**e-mail:** visnyk.khnu@gmail.com http://vestnik.ho.com.ua
http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm



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



© Хмельницький національний університет, 2019
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2019

# ЗМІСТ

## МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

**А.Р. СТАРИЙ, А.І. ГОРДЄЄВ**
ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ЗАБРУДНЕНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС РЕМОНТУ ПОТОКОМ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТКАМИ ТА ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ..... 7

**К.К. SCHERBYNA**
MECHANICS OF CONTACT INTERACTION OF ELASTIC HELICAL HONE AND MACHINING SURFACE ..... 15

**О.О. БРОВАРЕЦЬ, В.П. КОВБАСА, О.В. ЦУРКАН**
ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДО ПИТАННЯ ПРО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ХОДІ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОРОЗПУШЕННЯ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА У КОНТЕЙНЕРІ. ЧАСТИНА 2 .. 21

**А.Л. ГАНЗЮК, О.В. КРАВЧУК, О.О. КУДИНОВ, А.І. ГОРДЄЄВ**
СПЕЦІАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ПРИВЕДЕННЯ В ДІЮ РЕАКТИВНИХ ГРАНАТОМЕТІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ НАДІЙНОГО СПРАЦЮВАННЯ ..... 31

**О.О. СЛАЩУК, В.О. СЛАЩУК**
ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ, ОБУМОВЛЕНІ ХВИЛЬОВИМИ ПРОЦЕСАМИ ПРИ ТЕРТІ ..... 35

## ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

**М.О. КУЩЕВСЬКИЙ**
ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГОЛОВНИХ УБОРІВ ПНЕВМОРІДИННИМ СПОСОБОМ ..... 39

**М.С. ОНИСЬКО, Л.Є. ГАЛАВСЬКА**
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЖІНОЧИХ ТРУСІВ ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОЇ ДІЇ ..... 44

**Р.Ш. ІСКАНДАРОВ, Б.М. САВЧЕНКО, Н.В. СОВА, О.О. СЛЄПЦОВ**
БЕТТА НУКЛЕЙОВАНИЙ ПОЛІПРОПІЛЕН ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ПАКУВАННЯ З МОДИФІКОВАНОЮ АТМОСФЕРОЮ ..... 51

**І.М. ГРИЩЕНКО, А.Г. ДАНИЛКОВИЧ, Н.В. ПЕРВАЯ**
ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШКІРИ ДЛЯ ВЕРХУ ВЗУТТЯ ..... 55

## РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Ю.П. КЛЬОЦ, К.Ю. СТЕФАНОВИЧ, Є.С. ШАХОВАЛ, В.І. ДЕМЕШКО**
ДИНАМІЧНЕ БАЛАНСУВАННЯ ТРАФІКУ МІЖ ДЕКІЛЬКОМА ПРОВАЙДЕРАМИ ..... 62

**Л.О. КОВТУН, М.В. СТРУТИНСЬКИЙ**
МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ПРО НАДАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ ..... 68

**П.Б. ВІТИНСЬКИЙ, Р.О. ТКАЧЕНКО, І.В. ІЗОНІН, Н.О. КУСТРА**
АНСАМБЛІ НЕЙРОПОДІБНИХ СТРУКТУР МПГП З RBF РОЗШИРЕННЯМ ВХОДІВ ДЛЯ ЗАДАЧ РЕГРЕСІЇ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ..... 72

**О.В. ДЖУРАБАЄВ, О.В. БАРМАК, Е.А. МАНЗЮК, Т.К. СКРИПНИК**
ІНФОРМАЦІЙНА ЗОСЕРЕДЖЕНІСТЬ ЗМІСТОВНОСТІ В ТЕКСТІ ..... 80

**О.В. МАЗУРЕЦЬ**
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТВОРЕННЯ ТЕСТІВ ДО НАВЧАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ..... 84

**О.В. ОГНЄВИЙ, Л.Л. СИЧ**
МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДОСТУПУ ДО ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ СИСТЕМ ВІДЕОКОНФЕРЕНЦЗВ'ЯЗКУ ..... 92

**В.П. МАРЦЕНЮК, А.С. СВЕРСТЮК, Н.В. КОЗОДІЙ, Ю.В. КРАВЧИК**
ВИКОРИСТАННЯ ПАКЕТУ R ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТІВ АНТИГЕНІВ З АНТИТІЛАМИ В КІБЕРФІЗИЧНИХ ІМУНОСЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ НА ПРЯМОКУТНІЙ РЕШІТЦІ ..... 97

**О.В. ОГНЄВИЙ, М.В. ЗАВОРОТНИЙ, А.М. ОГНЕВА**
МЕТОДИ СТВОРЕННЯ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ РЕСУРСАМИ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ..... 106

**В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, А.О. ЛЮЛЬЧУК**
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ БЛОКОВИХ КОДІВ В УМОВАХ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ КОДУ, ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ ..... 111

**Н.М. ВАСИЛЬКІВ, Л.О. ДУБЧАК, І.В. ТУРЧЕНКО**
НЕЧІТКА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ ..... 121

**Д.В. ЧЕРНЕТЧЕНКО, М.М. МІЛИХ, К.В. ЛУДАНОВ**
АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОЇ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНОГО СИГНАЛУ (ЕКГ) ..... 126

**І.С. ПЯТІН, В.В. МІШАН, Д.М. ДУКАЧ**
ІНТЕРПОЛЯЦІЯ І ДЕЦИМАЦІЯ СИГНАЛІВ У ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ..... 134

**Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ, П.Ф. РОБУЛЕЦЬ**
СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ, ЩО ПЕРЕДАЮТЬСЯ ЧЕРЕЗ ПРОВІДНИКОВУ МЕТАСТРУКТУРУ ..... 141

**В.Р. ЛЮБЧИК, О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ, О.С. ЯНОВИЦЬКИЙ**
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО МЕТОДУ ПРИДУШЕННЯ СИГНАЛУ ЗАПИТУ БОКОВИМИ ПЕЛЮСТКАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ 147

**О.С. ПИВОВАР, Я.В. ВЕРЖБИЦЬКИЙ**
МЕТОД НЕЛІНІЙНОЇ РЕАКЦІЇ У СЕГМЕНТОВАНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ДІАГНОСТИЧНИХ ТА ОХОРОННИХ СИСТЕМ ..... 154

**В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, С.А. КОСТЮК**
РОЗРОБКА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ БЕЗДРОТОВИМ СПОСОБОМ В НАВКОЛОРЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМІ ..... 158

**М.В. БАЧИНСЬКИЙ**
КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА ПРИ ДІЇ НА ЙОГО ОРГАНІЗМ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО СВІТЛОДІОДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ..... 164

**О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, О.В. ПЕТРЕНКО, М.В. ІЛЬЧЕНКО**
ІНТЕГРУЮЧИЙ РЕЖИМ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ РЕЗОНАТОРОМ ..... 169

**В.Т. КОНДРАТОВ**
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО. ЧАСТЬ 7. ИЗМЕРЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ЛАНДАУ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ..... 176

**Д.Ю. ЗУБЕНКО, О.М. ПЕТРЕНКО**
ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВИЗОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ..... 192

**О.В. ОГНЄВИЙ, О.І. АКАТОВ, В.П. НЕЗДОРОВІН**
МЕТОД КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ КОНФІДЕНЦІЙНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ ХЕШУВАННЯ ..... 195

**В.І. КОРСУН**
ПРОЦЕДУРА ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МОБІЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ РАДІОМОНІТОРИНГУ ІЗ АПРІОРНО ВИЗНАЧЕНОЮ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ЇЇ РУХОМИХ РАДІОПРИЙМАЧІВ ..... 199

**В.П. КВАСНІКОВ, А.Л. ПЕРЕДЕРКО, Л.В. КУЗЬМИЧ, В.Ю. КОТЕТУНОВ**
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПРИЛАДОВИМИ СИСТЕМАМИ (В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ) ..... 204

## ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

**O. SHUIABOV, A. MALININA, V. DANYLO, V. CHYHIN**
SOURCE OF BACTERIOCIDIC ULTRA-VIOLET RADIATION AND FLOW OF NANO-PARTICLES OF ZINC AND COPPER OXIDE FOR APPLICATIONS IN MICROBIOLOGY, MEDICINE AND NANOTECHNOLOGY ..... 209

**Н.Ю. ГРИБОВА, О.Ю. КУРСЕНКО, О.І. ХИЖАН, Л.О. КОВШУН**
МЕТОДОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ПРОБ В КОНТРОЛІ ВМІСТУ КСЕНОБІОТИКІВ ..... 216

**В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ, К.Д. ХОРОЛЬСЬКИЙ, О.К. КОПАЙГОРА**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МЕДИЧНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ ТЕРИТОРІЙ З ТЕХНОГЕННИМ ЗАБРУДНЕННЯМ ..... 221

**Ю.П. ЗАСПА**
КОРПУСКУЛЯРНО-ВИХОР-ХВИЛЬОВІ ТЕРМОКОМПЛЕКСИ (ТРІОНИ) В ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ: ТЕХНІЧНИХ, КОСМІЧНИХ, ПСЕВДОЕЛЕМЕНТАРНИХ, БІОЛОГІЧНИХ. ЯДРО ЗЕМЛІ: ЧАВУН, РІДКИЙ ВУГЛЕЦЬ ТА АЛМАЗИ. ВЕЛИКИЙ АДРОННИЙ КОЛАЙДЕР: ГАРЯЧА ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРОТОНІВ. ХМАРА ООРТА: ХОЛОДНИЙ КОЛАПСНИЙ ГЕНЕРАТОР КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ ТА ДЖЕРЕЛО МІКРОХВИЛЬОВОГО ФОНОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ..... 227

**МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ**

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-7-14
УДК 631.3.033

А.Р. СТАРИЙ, А.І. ГОРДЄЄВ
Хмельницький національний університет

# ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ЗАБРУДНЕНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС РЕМОНТУ ПОТОКОМ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТКАМИ ТА ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

*Проаналізовано джерела походження забруднень деталей та вузлів згідно з технологіями та існуючі способи чистки і мийки, обладнання, яке реалізує ці способи. Усі вони мають свої переваги та недоліки. Вибір конкретного способу очистки та мийки обумовлюється залежно від виду та властивостей забруднень, від вимог, що ставляться до чистоти виробів, умов та типу виробництва, а також з урахуванням економічних чинників використання обладнання. Розглянуто теоретичні основи інтенсифікації процесу очистки та мийки. Запропоновано нову модульну конструкцію вібраційної машини для очистки та мийки. Сформовані завдання подальших досліджень.*

*Ключові слова: очистка, мийка забруднень, вібраційна машина.*

A.R. STARIY, A.I. HORDEEV
Khmelnytsky National University

## TECHNOLOGY OF CLEANING AND MIXING OF POLLUTION OF MACHINE PARTS AT THE REPAIR OF THE FLOW OF LIQUID WITH SOLID PARTICLES AND A VIBRATING MACHINE FOR ITS REALIZATION

*The sources of source pollution of parts and components according to the technologies and existing methods of cleaning and washing, equipment that implements these methods are analysed. All of them have their advantages and disadvantages. The choice of a specific method of cleaning and sinking is determined depending on the type and properties of the contaminants, from the requirements relating to the purity of the products, the conditions and type of production, and also taking into account the economic factors of the use of the equipment. From the analysis of the methods and equipment used in the repair of light industry machines, it was concluded that the most common method of cleaning and washing on repair stations is the method of immersion into the bath with solvent, wetting and subsequent brushing. Therefore, it is necessary to improve the quality of the process of cleaning and washing and replacement of manual labour, the creation of inexpensive equipment or machines of a universal type on a modular element base. The process of cleaning and washing the surface of the product by the flow of liquid can be divided into the following, interconnected elementary processes: the separation of particles from the contaminated surface, freezing of contaminants in the flow of fluid, the transport of contaminants to the filter device. The theoretical bases of intensification of the process of cleaning and washing are considered. A new modular design of a vibrating machine for cleaning and washing is proposed. Formed tasks of further research.*

*Keywords: cleaning, washing of pollutants, vibration machine.*

### Вступ

В процесі виготовлення, експлуатації машин і устаткування на поверхні різних деталей і складальних вузлів утворюються технологічні та виробничі забруднення. Якісне очищення об'єктів досягається комплексним фізико-хімічним і механічним впливом на забруднення, перше забезпечується використанням хімічних речовин, що впливають на забруднення, друге – використанням механічної енергії впливу на забруднення (скребки, щітки, струмені рідини, струмені абразиву).

Застосування хімічних речовин пов'язане зі значними витратами на складання миючих розчинів, в той же час вони чинять активний вплив на навколишнє середовище, забруднюючи її, а для операторів підвищується ризик виникнення захворюваності. Тому підвищення ефективності мийки та очищення бажано досягати за рахунок збільшення механічної дії на забруднення. Для забезпечення належної чистоти і якості поверхні деталей машин розроблено ряд процесів з використанням механічної дії. Частка спеціального обладнання, яке виготовляється для миття для очищення деталей, досить висока. Таке становище склалося через низький рівень уніфікації функціональних і конструктивних елементів машин, сумісних транспортних пристроїв. Задовольнити потреби промисловості в цьому плані можливо за рахунок впровадження очисних та мийних машин, побудованих на агрегатній і модульній елементній базі, які не поступаються подібним, спеціальним і забезпечують високу уніфікацію і гнучкість.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питаннями теорії та практики очистки і мийки деталей під час виготовлення та ремонту займалися багато вчених дослідників, а саме: Л.М. Гуревич, Ю.С. Козлов, А.А. Куликов, М.Б. Латишенко, А.П. Садовський, М.Ф. Тельнов, Р.І. Сілін, Н.А. Сівченко, А.А. Анділахай, але поява нових технологічних процесів виготовлення деталей, нових вимог до якості ремонту різноманітних об'єктів техніки призводить до пошуку нових технологій і методів і створення нових конструкцій установок для та мийки деталей об'єктів як у серійному, так і у дрібносерійному та одиничному типах виробництва в ході виготовлення деталей та ремонту техніки.

Якісне очищення об'єктів досягається за рахунок комплексної взаємодії фізико-хімічного та

механічного впливу миючого струменя на забруднення. Фізико-хімічний фактор забезпечується застосуванням нагрітих миючих розчинів, що пов'язано зі значними матеріальними витратами на придбання і нагрів цих розчинів при несприятливому впливі їх на навколишнє природне середовище. Тому розробка технології для поліпшення якості ремонту і технічного обслуговування об'єктів з їх поверхні необхідно видаляти не тільки слабо і середньо зв'язані забруднення (дорожній бруд, олійно-грязьові відкладення і т.д.), але і міцно зв'язані (продукти корозійного руйнування, старе лакофарбове покриття та т.п.), які займають близько 10% загальної площі поверхні об'єктів і мають найбільшу трудомісткість видалення.

Підвищення ефективності очисних та миючих установок досягається за рахунок підвищення механічної дії струменя на забруднення. Найбільш перспективними і поширеними з існуючих на сьогоднішній день технологій очищення та миття об'єктів є технології з використанням водяних струменів високого тиску [1–3]. Останнім часом зростання ефективності очищення машин при використанні технологій струминного очищення досягається за рахунок збільшення кінетичної енергії струменя шляхом підвищення тиску подачі миючої рідини або додаванням до неї абразивного матеріалу. Як збільшення механічного фактору, використовується застосування абразиву як окремо (сухі струмені), так і спільно з миючим розчином (водо-піскоструминна обробка) або підвищення тиску мийного струменя [4].

Дані способи забезпечують значну якість миття та очистки і високу продуктивність, але їх робота пов'язана зі значними енергетичними затратами через велику потужність приводу, яка необхідна для подачі води і абразиву. З цією метою необхідно розробляти технології, які здійснюють зрив забрудненого матеріалу під дією додаткових навантажень, створюваних в потоці миючої рідини, за менших зусиль. Для цих цілей перспективним є застосування вібраційних приводів в обладнанні та явище кавітації, яке має значну руйнівну енергію, а газові пухирці, які не сплеснулись, збільшують силу тертя газорідинного потоку на поверхні забруднення [5].

Відомі способи та конструкції машин та пристроїв з вібраційним приводом для чистки та мийки деталей та вузлів для різних забруднень, які виникають при виробництві або ремонті обладнання та техніки [6–9]. Пристрій [7] для мийки деталей містить ванну для миючої рідини, діафрагму, трубку сопло, сітку для розміщення деталей, електромагнітний вібраційний привод. Вадою даного пристрою є невелика амплітуда коливань мембрани при значній частоті (50 Гц), що створює невелику швидкість струменю з насадка, а також неможливість промивати виріб з різних боків. Пристрій [8] для мийки мілких деталей містить ванну для миючого розчину, дно якої має можливість коливатися, касету з деталями, яка встановлюється у ванну. Мийка деталей здійснюється періодичним омиванням поверхонь деталі мийною рідиною з великими швидкостями.

Створення вібраційного обладнання з пульсуючим робочим тілом на основі гідропульсатора (ГП) [5, 9], у якому робоче тіло виступає як інструмент, стримується недостатністю теоретичних та експериментальних досліджень в цій області. Цим зумовлюється актуальність роботи. Як показали раніше виконані дослідження динамічних явищ у рідинних середовищах [5], підданих керованим вібраційним впливам, що вони можуть бути успішно використані для здійснення та інтенсифікації зазначених процесів.

**Актуальність дослідження**

Метою роботи є створення конструкції універсальної вібраційної машини для вдосконалення технології очищення та мийки деталей машин, а саме створення нових способів очищення та мийки. Розробка нових конструкцій машин з вібраційними приводами і застосування більш гнучкого і уніфікованого обладнання для миття та очистки є актуальним завданням.

**Виклад основного матеріалу**

Сучасні підприємства оснащені дорогим і різноманітним устаткуванням, машинами, установками, роботизованими комплексами, транспортними засобами й іншими видами основних фондів. У процесі роботи вони втрачають свої робочі якості, головним чином через зношування і руйнування окремих деталей, тому знижується точність, потужність, продуктивність та інші параметри. Для компенсації зношування та підтримки устаткування в нормальному працездатному стані потрібні системне технічне обслуговування і виконання ремонтних робіт, а також проведення заходів щодо технічної діагностики.

Спрацювання устаткування в процесі його експлуатації і нераціональна організація технічного обслуговування та ремонту призводять до збільшення простоїв у ремонті, до погіршення якості обробки та зростання браку, а також до збільшення витрат на ремонт. Про значення покращення організації збереження та ремонту устаткування свідчать такі показники: річні витрати на ремонт і технічне обслуговування устаткування на підприємствах становлять 10–25 % його первісної вартості, а їхня частка в собівартості продукції сягає 6–8 %. Кількість ремонтників коливається у межах 20–30 % від загальної кількості допоміжних робітників.

Основними завданнями організації планування ремонтної служби підприємства є:

збереження устаткування в працездатному, технічно справному стані, що забезпечує його високу продуктивність і безперервну роботу;

скорочення часу і витрат на обслуговування та всі види ремонтів.

Вирішення таких завдань вимагає організації правильної експлуатації обслуговування, своєчасного проведення необхідного ремонту, а також модернізації устаткування.

Для виконання усіх видів робіт з організації раціонального обслуговування і ремонту устаткування й інших видів основних фондів на підприємствах створюються ремонтні служби, їхня структура залежить

від багатьох чинників: типу та обсягу виробництва, його технічних характеристик, розвитку кооперування під час виконання ремонтних робіт, системи централізації тощо.

Основними задачами ремонтного господарства є:

забезпечення безперебійної експлуатації обладнання із заданими характеристиками та експлуатаційними показниками;

організація раціональної системи експлуатації і ремонту обладнання, яка дозволяє підтримувати його в працездатному стані;

підвищення культури експлуатації і ремонту обладнання з метою продовження строку його служби, збільшення міжремонтного періоду та скорочення обсягу ремонтних робіт;

зниження трудомісткості і собівартості ремонтних робіт та підвищення їх якості;

модернізація обладнання.

Очищенню від забруднень та промиванню підлягає обладнання та машини за інструкціями заводів-виробників з врахуванням умов їх експлуатації. При промиванні здійснюється розбирання окремих вузлів, очищення розібраних вузлів від стружки та пилу, продуктів зношування. При цьому замінюються запобіжні прокладки, промиваються і прочищаються запобіжні фільтри, мастильні отвори.

Було проведено аналіз методів очистки та мийки об’єктів, згідно належності машин та обладнання до певного виду промисловості та особливостей технологій при яких виникають різні види забруднень, із поділом їх на слабо зв’язані з поверхнею та сильно зв’язані з поверхнею. Проведена класифікація представлена на рис. 1.

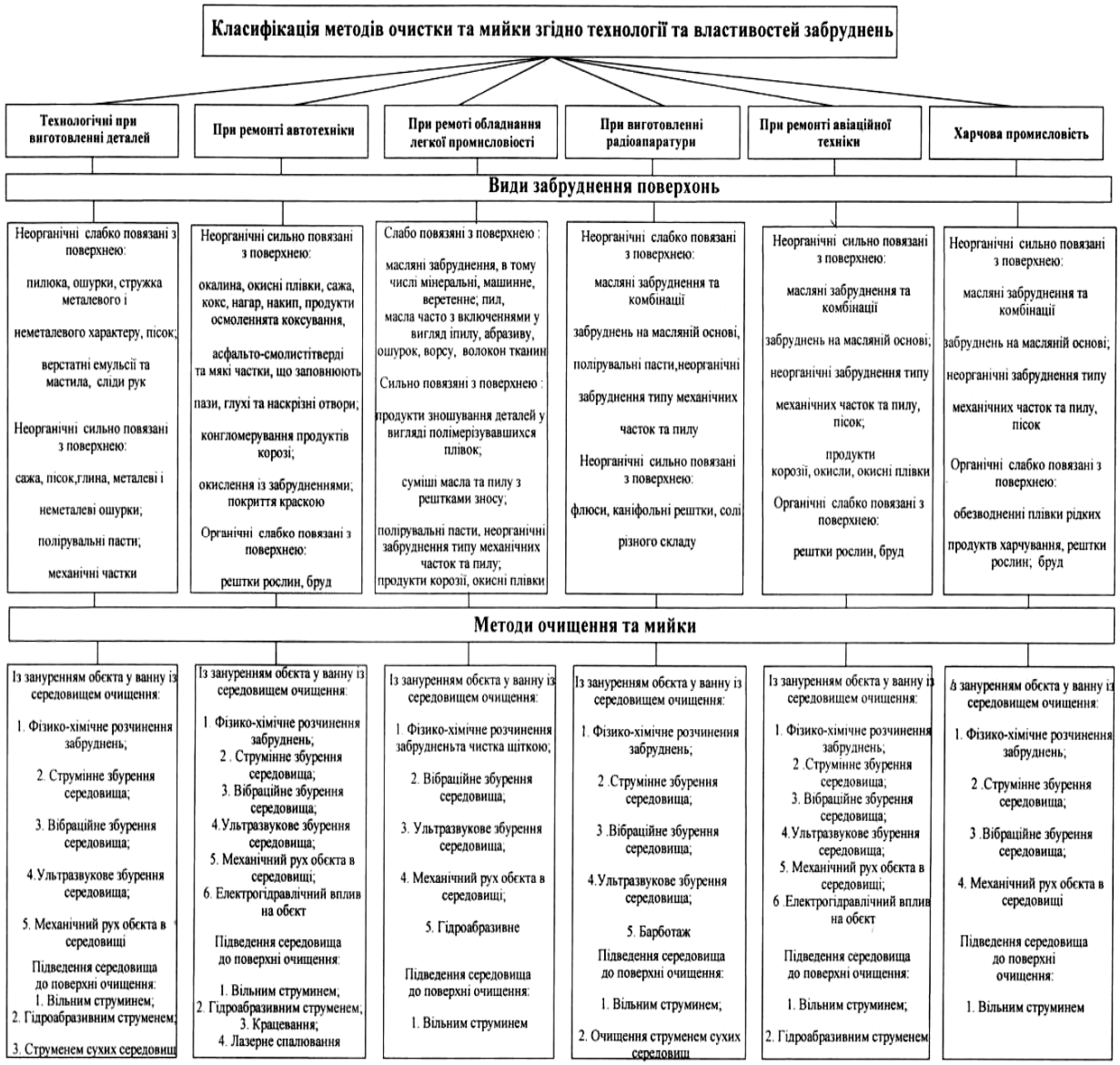



**Рис. 1. Класифікація методів очистки та мийки згідно виду промисловості, специфіки виникнення забруднень, технології очистки та мийки з урахуванням властивостей забруднень**

Аналіз джерел походження забруднень деталей та вузлів згідно з технологіями та способами чистки і мийки, обладнання, яке реалізує ці способи, свідчить про велике їх різноманіття. Усі вони мають свої

переваги та недоліки. Вибір конкретного способу мийки обумовлюється залежно від виду та властивостей забруднень, від вимог, що ставляться щодо чистоти виробів, умов та типу виробництва, а також з урахуванням економічних чинників використання обладнання.

Також очистка та мийка поверхні деталей, внутрішніх порожнин вузлів, агрегатів і систем являє собою сукупність складних фізико-хімічних й механічних процесів, ефективність яких залежить від властивостей миючого середовища, розміру й властивостей часток забруднень, технологічних режимів мийки, конструктивних особливостей деталей, що очищаються, агрегатів і систем. Вид і ступінь забруднення, що залишилося після мийки поверхні, залежить в основному від способу мийки та типу миючого середовища.

З наведеної класифікації, як об'єкт дослідження, було вибрано проектування вібраційної машини для очистки та мийки деталей та вузлів машин легкої промисловості. Проведений аналіз потреб обслуговування та ремонту обладнання на швейній фабриці ТЗоВ «Власта» м. Львів (табл. 1) показав, що організація технології ремонту має дрібносерійний характер, що характеризується різноманітною номенклатурою деталей та вузлів для очистки та промивання, присутні специфічні види забруднення, а відповідне обладнання відсутнє.

Таблиця 1

**Вузли та деталі обладнання легкої промисловості, які підлягають очистці та мийці**

| № п/п | Модель обладнання, машини | Вид ремонту | Назва вузлів та деталей, які підлягають очистці та мийці | Вид забруднення | Кіль кість машин |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ОВЕРЛОК Juki MO-6714DA-BE6-40H | середній | Шарові цапфи. | Продукти зношування, пил, старе мастило | 3 шт. |
| 2 | ОВЕРЛОК TYPICAL GN 793 | капітальний | Механізм петлячів, вузли передачі коливних рухів, шарові цапфи. | Продукти зношування, пил, ворс тканин | 4 шт. |
| 3 | УНІВЕРСАЛЬНА TYPICAL GC 6150HD | середній | Механізм човника. Вузол човникового валу | Пил, ворс тканин | 2 шт. |
| 4 | УНІВЕРСАЛЬНА TYPICAL GC 6160B | середній | Механізм голки. Вузол кривошипа | Пил, ворс тканин, продукти зношування | 2 шт. |
| 5 | РОЗПОШИВАЛКА TYPICAL GK 32500-11 | капітальний | Механізм переміщення. Вузол ексцентриків. | Продукти зношування, пил, старе мастило | 2 шт. |
| 6 | РОЗПОШИВАЛКА TYPICAL GK 1500D-02BB | капітальний | Механізм петлячів. Вузол передачі коливних рухів. | Продукти зношування, пил, старе мастило | 2 шт. |

З проведеного аналізу методів та обладнання, яке застосовується в ході ремонту, можна зробити висновок, що найбільш поширеним методом очистки та мийки на ремонтних дільницях є метод занурення у ванну з розчинником, відмочування з подальшою очисткою щітками. Тому виникає потреба заміни ручної праці, з метою підвищення якості процесу очищення та мийки, шляхом створення недорогого обладнання чи машин універсального типу із застосуванням модульної елементної бази.

В процесі роботи обладнання швейних цехів його рухомі деталі з певним часом покриваються забрудненням на основі змащувальних матеріалів, в які попадають пил, волокна тканин, що призводить до заїдання різних механізмів, продукти зношування підшипників вузлів ковзання можуть призводити до заклинювання вузлів від перегріву, а далі це веде до погіршення роботи обладнання зі зниженням якості виготовлення продукції та виробів (рис. 2, рис. 3).

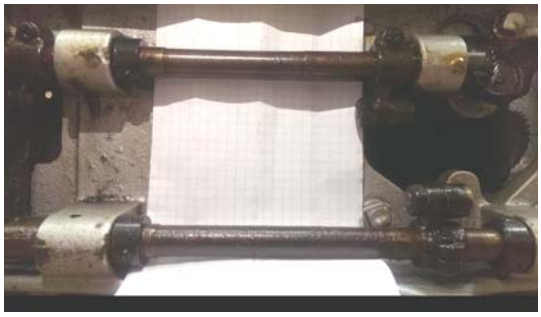


**Рис. 2. Вали із забрудненнями у вузлах ковзання**

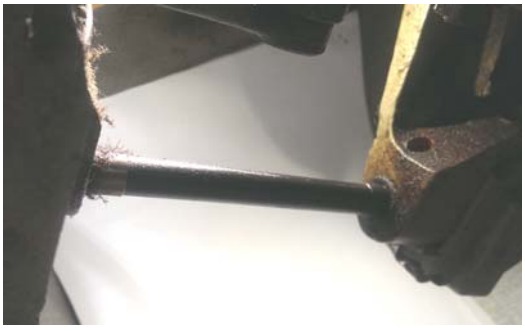


**Рис. 3. Вигляд забруднення валу**

Технологія оброблення поверхні виробів потоком твердих часток все більше поширюється в різних галузях промисловості. Зокрема, це такі процеси: дробо-струминне наклепування, пнемо та гідро-

струминно-абразивна обробка, пневмо-струминне очищення поверхонь від облою пластмасових армованих деталей кульками або абрикосовою дробленою кісткою [1]. Одним з напрямків створення машин для процесу очистки та мийки виробів є метод пульсуючої гідро-струминної дії у ваннах потоком рідини з частками різної твердості [5]. Це дозволяє при невисоких напорах рідини завдяки отриманню процесу мікрорізання забруднення отримувати значний ефект інтенсифікації очищення та мийки.

Режим мийки поверхні деталі потоком миючої рідини (оптимальну технологію) визначають, виходячи з аналізу гідродинамічної взаємодії миючої рідини з частками забруднень, а також на підставі результатів експериментальних досліджень. У цьому зв'язку, розглянемо механізм видалення забруднень зануреним потоком миючої рідини із включеннями твердих часток та газових пухирців. Не применшуючи при цьому значення фізико-хімічних факторів, обумовлених активністю миючого середовища, вважається, що процес механічного впливу рідини на забруднення є однією з основних умов, що визначає ефективність очистки та мийки [1]. Процес очистки та мийки поверхні виробу потоком рідини з твердими частками можна розділити на наступні, зв'язані між собою елементарні процеси: відрив часток забруднень та їх змивання з поверхні, що очищається, зависання забруднень у потоці рідини, транспортування забруднень до фільтруючого пристрою.

Потік миючої рідини у пульсуючому струмені, при взаємодії із забрудненою поверхнею, розплющується та розтікається в сторони від центру контакту з поверхнею. При цьому, на поверхню з боку потоку з частками, діє сила тертя потоку рідини з частками, який розтікається по забрудненій поверхні та сила гідродинамічного тиску, що створює нормальний або дотичний тиск на забруднену поверхню, який визначається за залежністю:

$$P = \frac{\rho_ч \cdot V_ч^2}{2} \cos\beta, \tag{1}$$

де $P$ – осереднений тиск частки та струменя рідини; $\rho_ч$ – щільність матеріалу твердої частки;

$V_ч$ – осереднена швидкість частки та струменя рідини; $\beta$ – кут нахилу поверхні до осі струменя.

Осереднену швидкість частки у струмені рідини можна знайти за умови:

$$V_ч \geq \sqrt{\frac{[\sigma]}{\rho_ч}}, \tag{2}$$

де $[\sigma]$ – граничне напруження адгезійних зв’язків забруднення.

При турбулентному режимі руху рідини з частками відбувається дуже енергійне хаотичне перемішування рідини. Турбулентні пульсації переносять імпульс рідини до поверхні твердого тіла і це призводить до появи середнього потоку імпульсу до поверхні. Перенесення імпульсу в рідині можна характеризувати турбулентною в’язкістю. В загальному випадку осереднений турбулентний потік одночасно має молекулярну й турбулентну в'язкість. Тому повне сумарне дотичне напруження тертя потоку рідини без включень на поверхні визначається за формулою:

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** , (3)

де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. –** динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. –** коефіцієнт пропорційності, що називається динамічним коефіцієнтом турбулентного обміну; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. –** градієнт швидкості.

Для двофазних середовищ (рідина з включеннями твердих часток або газових пухирців) широке розповсюдження має поправка Ейнштейна до динамічного коефіцієнта несучої фази.

Врахувавши її, тоді узагальнений динамічний коефіцієнт несучої фази можна виразити через відповідні коефіцієнти: **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. –** для чистої несучої фази;**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.–** для домішок твердих часток або газових пухирців із сферичною формою часток.

Газові пухирці, що виникають у потоці рідини, при протіканні рідини через насадок із гострими крайками на вході, мають розміри порядку від 0,1 мм до 0,3 мм в діаметрі та вважаються твердими домішками тому, що тиск всередині газових пухирців перевищує тиск у потоці рідині. Тому динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази прийме вигляд:

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** , (4)

де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.–** об'ємна доля домішок твердих часток або газових пухирців.

З урахуванням (4) дотичні напруження тертя турбулентного потоку несучої фази з включеннями твердих часток або газових пухирців можна представити наступним виразом:

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** . (5)

У результаті аналітичних досліджень встановлено, що наявність у потоці рідини твердих часток або

газових пухирців, які утворюються при протіканні рідини через насадок з гострими крайками на вході, збільшують дотичні напруження тертя і поводяться як «тверді частки» у двофазному середовищі, що дозволяє підвищити інтенсивність процесу очистки та мийки забруднень. А наявність у потоці рідини часток (полістиролової крихти), з твердістю більше ніж твердість забруднення, дозволяє збільшити нормальні та дотичні напруження потоку рідини та створити умови мікрозрізання забруднення.

Створення вібраційного обладнання універсального типу з пульсуючим робочим тілом на основі ГП, у якому робоче тіло виступає як інструмент, стримується недостатністю теоретичних та експериментальних досліджень в цій області. Цим зумовлюється актуальність роботи. Як показали раніше виконані дослідження [5] динамічних явищ у багатофазових середовищах, підданих керованим вібраційним впливам, що багато з них можуть бути успішно використані для інтенсифікації зазначених процесів. Активне й цілеспрямоване використання вібраційних впливів, як основного провідного фактору, є перспективним напрямком у вібраційній технології, зв'язаною з обробкою поверхонь матеріалів у рідкому середовищі, що містить частки твердої фази.

Як було вже сказано, що у процесі роботи обладнання легкої промисловості його рухомі деталі з певним часом покриваються забрудненням на основі змащувальних матеріалів в які попадають пил, волокна тканин, що призводить до заїдання різних вузлів ковзання машини (табл. 1), а далі це веде до погіршення її роботи із зниженням якості виробу.

Проектування конструкції вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання [10], з метою прискорення процесу очищення виробу, досягається шляхом створення пульсуючого потоку рідини з твердими частками. А введення додаткового елементу (гідравлічного зворотного клапана) у конструкцію машини дає можливість зменшення швидкості рідини у насадку в момент втягування її у камеру пульсації та уникнення можливості виникнення газових пухирців у камері пульсації, що дозволяє при стисканні рідини у камері пульсації виключити демпфуючий фактор та здійснити підвищення частоти коливань приводу, а це у свою чергу веде до підвищення швидкості струменю з насадка та продуктивності машини.

Поставлена задача вирішується тим, що вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей містить дві ванни закріплених на корпусі з кришкою, яка має можливість рухатися по напрямним на роликах. У ванну очистки встановлено: сітчастий контейнер у якому розміщено сопло над сіткою з твердими частками і вісь сопла співвісна з віссю насадка, корпус з мембраною та дисками, який створює камеру пульсації миючої рідини. Мембрани за допомогою штоків з'єднані з вібраційними приводами. На дні ванни очищення розміщено насадок та зворотний клапан. У ванні для мийки на дні встановлено насадок, з'єднаний з камерою пульсації.

Для досягнення максимальної продуктивності процесу очищення та мийки виробу конструктивні параметри камери пульсації, насадка частотний режим роботи вібраційного приводу вибирають за умови:

$$f = \frac{D_н^2}{2D_к^2 \cdot A}\sqrt{\frac{P}{\gamma}}, \tag{6}$$

де $f$ – частота коливань мембрани, Гц; $D_н$ – діаметр насадка, $D_к$ – діаметр мембрани камери пульсації, ($D2_н/D2_к$ = 12-14); $P$ – тиск у рідини, $P$ = 0,12-0,15 МПа; $A$ – амплітуда коливань мембрани камери пульсації, $A = (2 \div 3)\cdot 10^{-3}$ м; $\gamma$ – питома вага рідини, $\gamma$ = 1000Н/м$^3$.

Конструкція вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання (рис. 4) містить основу 1, на якій встановлено вібропривід 2, на стійках 3 розміщено дві ванни 4 – для очищення у потоці рідини та полістироловими кульками, 5 – для мийки пульсуючим потоком миючої рідини; на дні ванн 4 та 5 закріплено корпус камери пульсації 6 за допомогою насадка 7 (діаметром $D_н$) та нижня частина корпуса 6 (діаметром $D_к$) закрита мембраною з дисками 8, яка закріплена до штока 9 віброприводу 2, а порожнина камери пульсації 6 з'єднано мембранним клапаном 10 та забірною трубкою 11 з порожниною ванни 4 у яку встановлено контейнер 12 з боковими сітками 13 та сіткою 14, яка розташована над соплом 7, у коробі 12 розміщено сопло 15, ванни 4 та 5 закриті кришкою 16 яка має можливість рухатися по напрямним 17 на роликах 18 які встановлені на осях 19, на кришці 16 за допомогою кутників 20 встановлено мотор-редуктор 21, який муфтою 22 з'єднано із затискачем 23 для деталі 24, у контейнер 12 засипано тверді частки (полістиролові кульки) 25, а у ванни 4 та 5 залита миюча рідина 26, яку після спрацювання можна злити крізь кран 27.

Працює вібраційна машина наступним чином: у ванни 4, 5 заливають миючу рідину 26 (водний розчин поверхнево-активних речовин) та засипають у контейнер 12 тверді частки (полістиролову крихту) 25, деталь 24, яка підлягає очищенню, закріплюють у затискачі 23 та встановлюють кришку 16 у напрямні 17. Включається мотор-редуктор 21, який обертає деталь 24 та вібропривід 2, що призводить до коливання мембрани з дисками 8 і у насадку 7 виникає пульсуючій струмінь рідини, який проходить крізь сітку 14 та захватує тверді частки (полістиролові кульки) 25, вдаряє ними по забрудненню та зриває його не порушуючи поверхню деталі. Надалі тверді частки 25 осідають по стінках контейнера та сітці 14 під сопло 15. При русі мембрани з дисками 8 униз миюча рідина 26 проходить крізь отвір у насадку 7 та забірну трубку 11 і відкритий клапан 10 із меншим

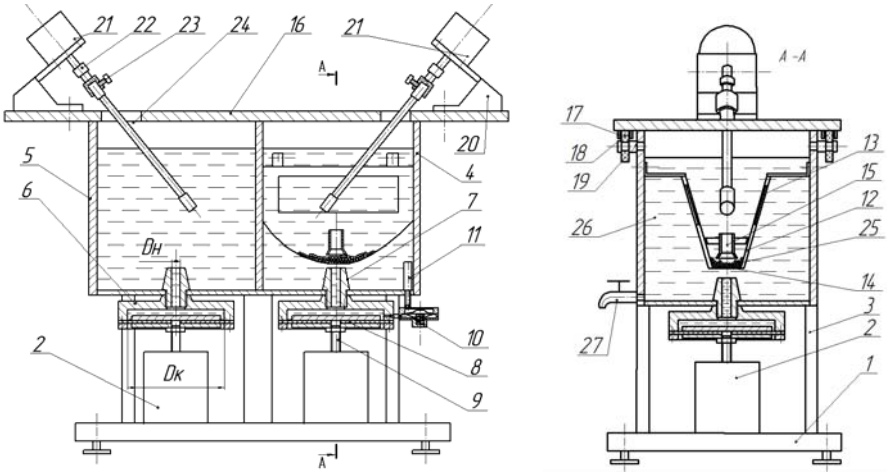



**Рис. 4. Конструкція вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання: 1 - основа; 2 - вібропривід; 3 - стійкі; 4 - ванна; 5 - полістиролові кульки; 6 - корпус камери пульсації; 7 - насадок (діаметром $D_н$); 8 - мембрана з дисками; 9 - шток; 10 - мембранний клапан; 11 - забірна трубка; 12 - контейнер; 13 - бокові сітки; 14 - сітка; 15 - сопло; 16 - кришка; 17 - напрямні; 18 - ролики; 19 - осі; 20 - кутник; 21 - мотор-редуктор; 22 - муфта; 23 - затискач; 24 - деталь; 25 - тверді частки (полістиролові кульки); 26 - миюча рідина; 27 - кран для зливу**

зусиллям тяги приводу та витратою енергії вібраційного приводу. При русі мембрани з дисками 8 з уверх здійснюється протікання миючої рідини 26 крізь насадок 7, а клапан 10 закривається. Деталь 24 обертається, а кришці 16 вручну надається поздовжньо-поступний рух і очистка деталі 24 проводиться зі всіх сторін на необхідній довжині. Після очищення кришка 16 піднімається та деталь 24 перевстановлюється і проводиться очищення з іншої сторони деталі 24. Після підняття кришки 16 очищена деталь 24 знімається та встановлюється у затискач 23 у ванні 5 для мийки, а забруднена деталь 24 встановлюється у затискач 23 у ванні 4 для очистки. Кришка 16 встановлюється у напрямні 17 та включається мотор-редуктор 21 та вібропривід 2. У ванні 4 проводиться очистка деталі 24, а у ванні 5 проводиться мийка деталі 24 після її очищення. Після проведення мийки у ванні 5 деталі 24 та очищення деталі 24 у ванні 4 мотор-редуктор 21 та вібропривід 2 виключаються та проводиться виїмка деталі 24 з ванни 4, а на її місце встановлюється деталь 24 з ванни 5 після очищення. При спрацюванні миючої рідини 26 (її забрудненню) її зливають крізь кран 21, а спрацьована крихта замінюється на нову.

У вібраційній машині застосовано мотор редуктор, на валу якого є можливість закріплювати через оправку деталі або затискні оправки під певну конструкцію вузла, який очищується та потім промивається.

В конструкції вібраційної машини застосовано модульний принцип проектування, а саме у ваннах для створення пульсуючого потоку рідини використано уніфікований вібропривід робочого органу – гідропульсатор як для очищення, так і для мийки деталей, що підвищує рівень уніфікації функціональних і конструктивних елементів машин.

**Висновки**

Запропонована конструкція вібраційної машини дозволяє підвищити продуктивність процесу очистки і мийки та знизити енерговитрати обладнання.

Простота конструкції та значний рівень уніфікації функціональних і конструктивних елементів машини дозволяє застосовувати її на підприємствах з дрібносерійним та одиничним типом виконання ремонтних робіт по обслуговуванню технологічного обладнання.

Для подальшого проведення досліджень та створення методики проектування вібраційної машини для очистки і мийки необхідно виконати наступні завдання:

встановити взаємозв’язок конструктивних параметрів машини з режимами роботи приводу;

визначити оптимальну відстань між деталлю та соплом гідропульсатора;

визначити оптимальний об’єм твердих часток;

визначити амплітуду та частоту коливання приводу для створення струменя з максимальним тиском у насадку;

провести порівняльні дослідження по продуктивності очищення та мийки модельних забруднень.

**Література**

1. Козлов Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, Н.Ф. Тельнов. – М. : Машиностроение, 1982. – 261 с.

2. Тельнов Н.Ф. Технология очистки сельскохозяйственной техники / Н.Ф. Тельнов. – М. : Колос, 1983. – 256 с.

3. Козлов Ю.С. Очистка автомобилей при ремонте / Ю.С. Козлов. – М. : Транспорт, 1981. – 151 с.

4. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. –

Мариуполь : ПГТУ, 2006. − 190 с.

5. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора : монографія / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 386 с.

6. 6.Тельнов Н.Ф. Очистка массивных объектов колебанием в среде моющей жидкости / Н.Ф. Тельнов, В.И. Савченко, В.И. Ушмарин // Техника в сельском хозяйстве. – 1984. – № 1. – С. 49–50.

7. А. с. 1130422 СССР, МКИ$^3$ В 08 В 3/10. Устройство для мойки мелких изделий / А.И. Гордеев, Р.И. Силин, Н.А. Сивченко (СССР). – № 3613130/28–12 ; заявл. 15.04.83 ; опубл. 23.12.84, Бюл. № 47. – 3 с.

8. А. с. 880519 СССР, МКИ$^3$ В 08 В 3/10. Устройство для промывки изделий / Р.И. Силин, В.П. Кошель, А.И. Гордеев (СССР). – № 2869224/28–12 ; заявл. 17.12.79 ; опубл. 15.11.81, Бюл. № 42. – 3 с.

9. Пат. на корисну модель 116030 України, МПК B03B 5/02. Вібраційна машина для мийки радіотехнічних виробів / Гордєєв А.І., Гордєєв О.А., Мігаль В.Г. (Україна) ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – u 2016 10059 ; заяв. 03.10.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.

10. Пат. на корисну модель № 132837, МПК B08B 3/10. Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання / Скиба М.Є., Старий А.Р., Гордєєв А.І., Гордєєв О.А. – U201810344 ; заявл. 19.10 2018. Опубл. 11.03.2019. Бюл. № 5.

**References**

1. Kozlov Yu.S., Kuznetsov O.K., Telnov N.F. Cleaning products in mechanical engineering. Moscow: Mechanical Engineering, 1982. 261 p.

2. Telnov N.F Technology of cleaning of agricultural machinery. M.: Kolos, 1983. 256 p.

3. Kozlov Yu.S. Cleaning cars at repairs. M.: Transport, 1981. 151 p.

4. Andilahi A.A. Abrasive treatment of parts with flooded jets. Mariupol: PGTU, 2006. 190 p.

5. Silin R.I., Hordeev A.I. Vibration equipment on the basis of a hydropulse: a monograph. Khmelnytsky: KhNU, 2007. 386 p.

6. Telnov N.F., Savchenko V.I., Ushmarin V.I. Purification of massive objects by oscillation in a washing liquid medium. Engineering in agriculture. 1984, № 1. p. 49-50.

7. A. s. 1130422 USSR, MKI3 at 08 V 3/10. Device for washing small articles / A.I. Hordeev, R.I. Silin, N.A. Syvchenko (USSR). № 3613130 / 28-12; stated. April 15, 83; published 23.12.84, Bull. № 47.

8. A. s. 880519 USSR, MKI3 at 08 V 3/10. Device for product rinsing / R.I. Silin, V.P. Koshel, A.I. Hordeev (USSR). No. 2869224 / 28-12; stated. 17.12.79; published November 15, 81, Bull. № 42.

9. Pat. to utility model 116030 of Ukraine, IPC B03B 5/02. Vibration machine for sinking radio products / Hordeev A.I., Hordeev O.A., Migal V.G.; Applicant and patent holder Khmelnytskyi National university - u 2016 10059; Application 03.10.2016; Published by May 10, 2017, Bul. № 9.

10. Pat. for utility model No. 132837, MPK B08B 3/10. Vibration machine for purification of contaminations by a stream of solid particles and washing of details at repair of equipment. Skyba M.E., Stariy A.R., Hordeev A.I., Hordeev O.A. U201810344; Declared 19.10 2018. Published March 11, 2019. Bull № 5.

Рецензія/Peer review : 8.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-15-20
UDC 621.923.5

K.K. SCHERBYNA
Central Ukrainian National Technical University

# MECHANICS OF CONTACT INTERACTION OF ELASTIC HELICAL HONE AND MACHINING SURFACE

*The principle of studying the deformation of the elastic deformable shell of the elastic helical hone is considered in the article. The obtained theoretical and experimental studies have been taken into consideration. As a result, we determined the non-uniformity of the elastic helical hone in the radial direction on each turn of the elastic deformable shell. The method of preparation of the elastic helical hone for the processing of precise holes with the possibility of correction in automatic mode in the machine was developed.*

*Key words: honing of holes, contact interaction, elastic deformable shell, elastic helical hone, adjustment of radial size.*

К.К. ЩЕРБИНА
Центральноукраїнський національний технічний університет

**МЕХАНІКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРУЖНО-ГВИНТОВОГО ХОНА І ОБРОБЛЮВАНОЇ ПОВЕРХНІ**

*В статі розглядається принцип дослідження деформації пружно-деформуємої оболонки пружно-гвинтового хона з урахуванням отриманих теоретичних та експериментальних досліджень. В результаті чого було визначено нерівномірність пружно-гвинтового хона в радіальному напрямку на кожному витку пружно-деформуємої оболонки. Була розроблена методика підготовки пружного-гвинтового хона для обробки прецензійних отворів з можливістю правки в автоматичному режимі на верстаті.*

*Ключові слова: хонінгування отворів, контактна взаємодія, пружно-деформуєма оболонка, пружно-гвинтовий хон, регулювання радіального розміру.*

## Problem statement and analysis of research

The analysis of the mechanics of contact interaction of the diamond-abrasive tool with the machining surface allowed putting forward a number of requirements for the implementation of the stage of the prior passes and the stage of the final passes. These requirements are fundamentally different [1].

At the stage of prior passes, it is necessary to preserve the local guaranteed gap in the contact with the "hone-machined surface" for removing chips. The cutting process is significantly influenced by volume of the gap in the contact, that is the space between the reliefs of the hone and the machining surface at a certain length after converging them under the action of the applied loading.

Insufficient volume for chip removal leads to the tool greasing and the reduction of its performance.

At the stage of final pass, it is necessary to ensure the maximum approximation of the hone geometry to the geometry of the machining surface [2].

The main disadvantage of hone operation of traditional design is the presence of uneven wear, which can not be eliminated by the adjustment of radial size control systems.

The authors of the works [2, 3, 4, 5, 6] offer to reduce the unevenness of wear using combined kinematics of movements and variations in pressure during the honing process. But with such a change it is possible to achieve only the reduction of uneven wear by 50% [3]. In addition, for the implementation of combined kinematics of movements and variation of contact pressures, the machine tool becomes considerably complicated [3]. In connection with the above-mentioned facts it is expedient to change the geometrical shape of the cutting surface for prior and final passes of honing. At the same time, this change in geometry should be aimed at preserving the geometric part of the hone that will carry out the clean passes. Generally, it is necessary to meet some requirements for the implementation of prior and final honing, including:

1. Division of the cutting surface of the hone into the parts for prior passes and the parts for final passes [3].
2. The part of the cutting surface which treats the final pass must not interact with the machining surface by providing the gap necessary and sufficient to maintain the lead-in action in the process of prior honing.
3. Providing relatively high contact pressure and relatively increased space in the contact area for removing chips at the stage of prior passes of honing holes.
4. Ensuring a sufficient contact plane at the final pass of the honing holes.

## Topicality of research

The requirements for the quality and accuracy of processed precise holing are constantly increasing. The quality directly affects the reliability of mechanisms. Therefore, the study of interaction between the elastic helical hone and the machining surface in the process of honing is a very important task.

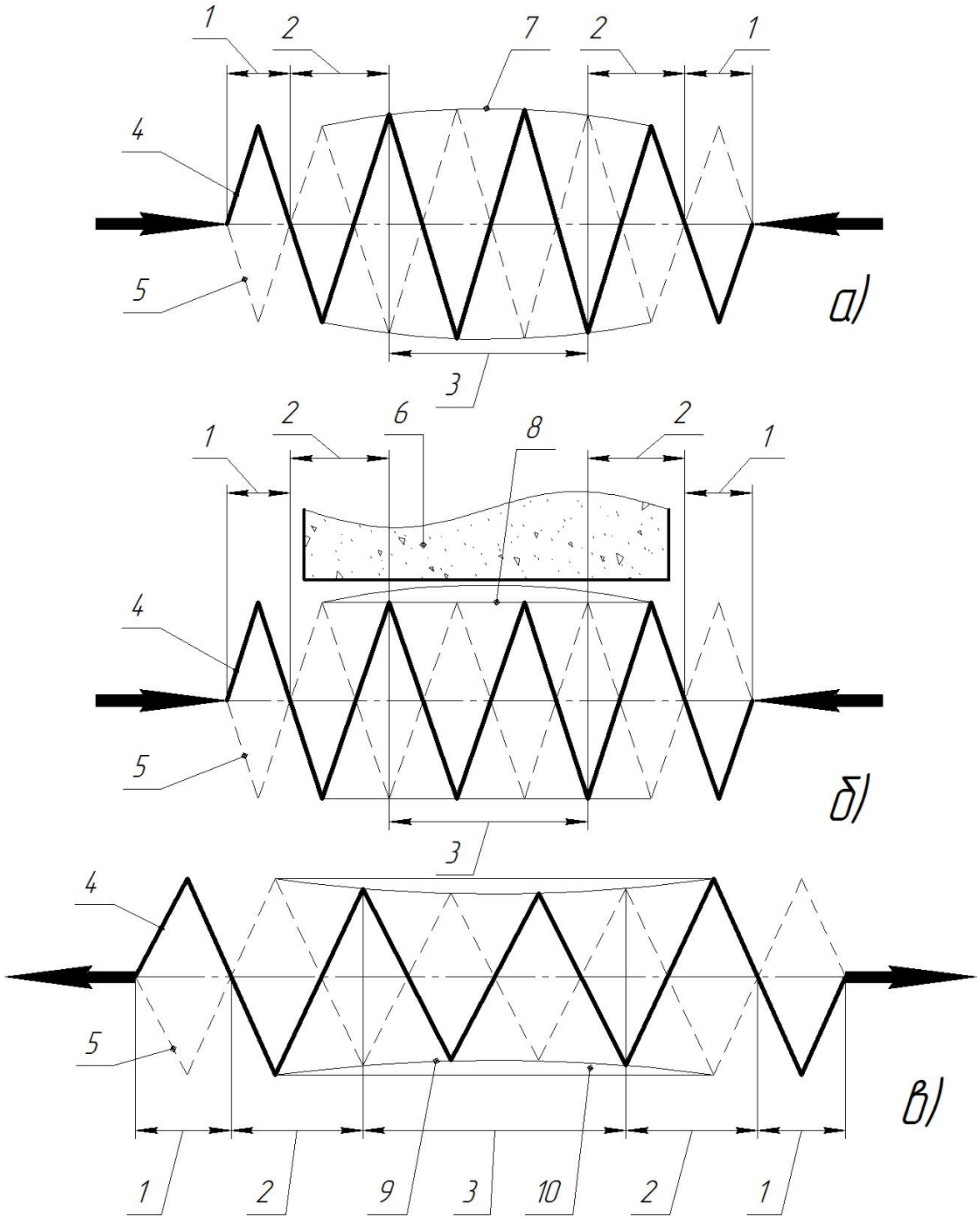
## Research of the mechanics of contact interaction of elastic helical hone in the process of honing

Taking into consideration the above-mentioned facts, the synthesized elastic helical hone must meet the requirements for the machining in the conditions of the stage of prior passes, as well as for the conditions of the stage of final pass.

Thus, the possibility to influence the mechanics of the contact interaction due to design development of the

hone will ensure that the requirements are met.

Figure 1 shows the schematic diagram of the change in geometry of the elastic helical hone as a result of design development. Initially, the elastic helical hone is deformed to a nominal design value along its own geometric axis (Fig. 1, a).




**1 - lead-in part; 2 - cutting part at the prior pass of honing; 3 - the calibrated part at the final pass of honing; 4 - the contour of elastic helical hone; 5 - projection of the contour when turning to angle 180; 6 - grinding wheel; 7 - barrel-shaped surface; 8 - cylindrical surface; 9 - saddle-shaped surface; 10 - space for moving out of the zone of interaction with the treated surface and the formation of the lead-in section;**

**a) the scheme of probable deformation of the outer contour of the elastic helical hone; b) the grinding scheme of the external contour of the elastic helical hone in nominal size under the conditions of compressed state; c) the scheme of reverse deformation of the outer contour of the elastic helical hone due to the unloading of the compression forces to obtain the radial size of the original value**

**Figure 1. The shape of the surface of the elastic helical hone in the longitudinal section**

In this case, the outer surface is likely to get a barrel shape 7. The obtained specified changes in geometric shape and elastic deformation are described by the system of equations [1]:

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

,

(1)

where $\varphi_3$ – twist angle or the lift angle of the helical line after loading;
$P_z$ – axis force;
$R$ – radius of the cylinder of the body of elastic deformable shell along axis line of the crossed cut;
$i$ – number of spirals of elastic deformable shell;
$\sigma_2$ – springiness modulus of the second kind or slip modulus;
$I$ – inertia moment, geometric characteristics of toughness while twisting;
$\alpha$ – lift angle of the helical line before loading;
$\lambda$ – draft value of elastic deformable shell while loading;
$\varphi_i$ – lift angle of the helical line after loading.

In this fixed position, the grinding of the surface is performed until the values of the nominal diametric size are reached. The cylindrical surface 8 should be treated on length 3, and partly on length 2.

In this case, the outer cylindrical surface of the elastic helical hone is conventionally divided into three parts, including:

1 - the lead-in part with the surface formed by the incomplete turn;

2 - cutting part with the surface formed by the complete turn. This surface is processed by cutting first and reproduces the sharp-top form on the surface;

3 - the calibration part which is adjacent to the cutting part and reproduces the flat-top form on the surface [1].

Thus, the elastic helical hone is fixed in accordance with Fig. 1b and is used for the final pass of honing. This is due to the fact that the hone has a sufficient supporting surface as a calibrating part of cylindrical shape which meets the requirements for the final pass.

Fig. 1 presents the scheme of the elastic helical hone adjusted for the prior pass by means of release and elastic deformation in the opposite direction and reduction of the diametric size.

In this case, the part of the outer surface gets a saddle-shape form 9, forming space 10 for removal of the chips. This form meets the requirements, which ensure its functioning as a lead-in section.

Fig. 2 shows the longitudinal sections of the elastic helical hone that correspond to the lead-in part (Fig. 2, a, c), the cutting and calibration part (Fig. 2 b, d). At the same time Fig. 2, d shows the interaction of the calibration part of the hone with the treated surface in the conditions of the prior pass with the presence of gap 6.

In fig. 2, b the calibration part interacts with the treated surface in the final pass.

Thus, the synthesized elastic helical hone belongs is the instrument with a developed micro-relief, with a relatively minimized bearing profile length and the ability to change the geometry of the contact during the honing process.

Fig. 3 shows the protocol of measuring the elastic helical hone, which was measured on the coordinate-measuring machine.

The protocol contains measurements on four points located at the angle of 90° to each other. The measurements were carried out in three states of the elastic helical hone.

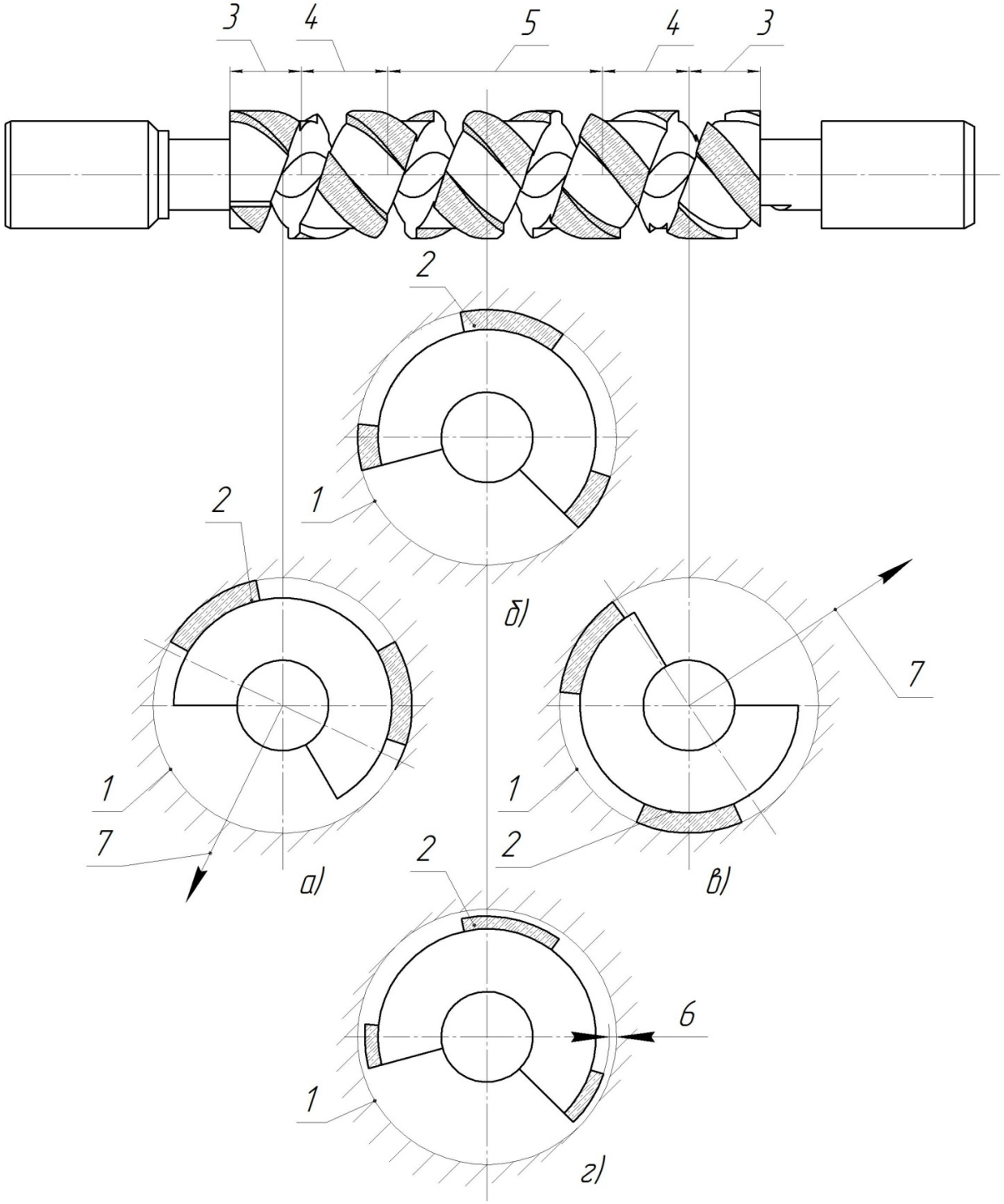
The first measurement was carried out in the conditions of maximum required compression of the elastic helical hone. In this case the outer contour has the barrel-shaped form with the extreme point of ~ 25 microns, which is located in the centre of the calibration part.

The second measurement was carried after the grinding of the working surface. In this case, the deviation from the cylindrical form fluctuates within 5 ... 6 microns.

The third measurement was carried out in the conditions of release of the elastic helical hole to make the prior pass. In this case, the part of the outer contour had the saddle-type shape with the extreme deviation of 10 ... 15 microns.

The change in the geometry of the hone can be carried out automatically on special machines equipped with automatic control systems.

When machining is carried out on universal machines, the hones are adjusted in advance, depending on the type of pass.




**1 – contour the machined hole; 2 – diamond abrasive stones; 3 – lead-in part; 4 – cutting part at the stage of prior pass of honing; 5 – calibrated part after final pass of honing; 6 – gap in the area of calibration part to ensure functioning, as a lead-in section; 7 – vector of the direction of the degree of freedom for the orientation of elastic helical hone along the contour of the hole;**
**a) the diagram of contact of lead-in part; b) the diagram of the contact of the calibration part at the final pass; c) diagram of contact of the outlet part; d) diagram of contact of the calibration part at the prior pass**
**Figure 2. Interaction of elastic helical hole with machining surface**

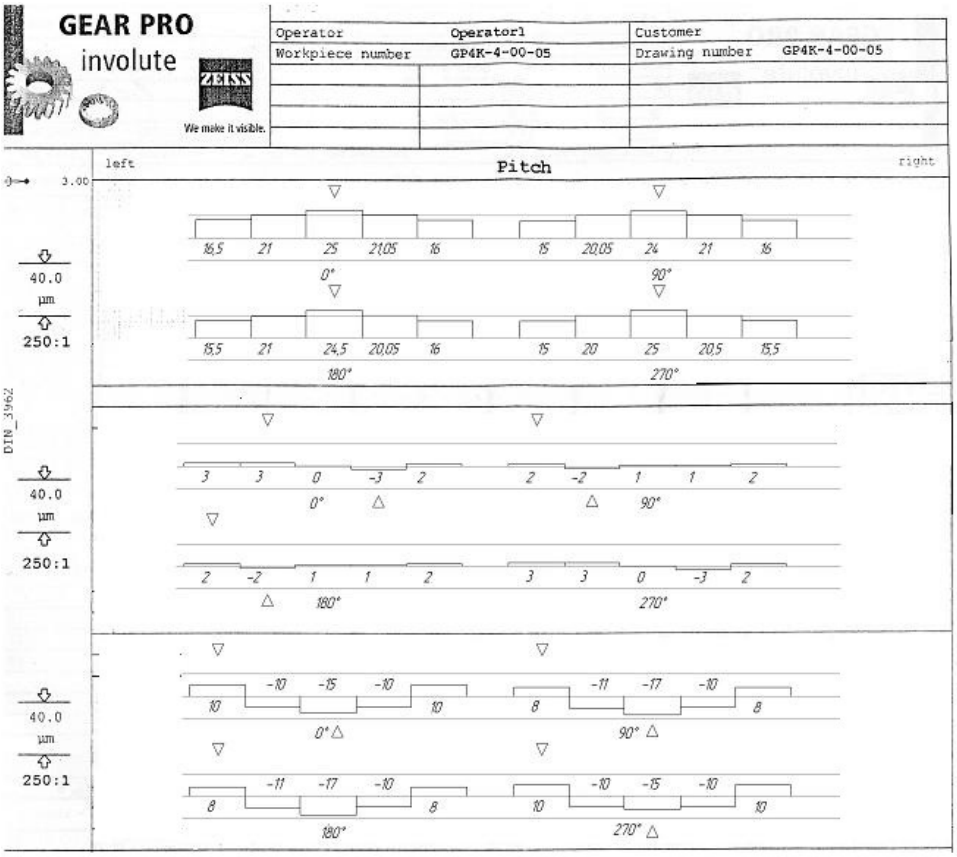



**Figure 3. Protocol of measuring the outer cylindrical contour of the elastic helical hone on the coordinate measuring machine**

**a)** **b)**

**1 – Carl Zeiss CONTURA G2 coordinate measuring machine; 2 – measuring probe; 3 – elastic helical hone.**
**a) a general view of the area of measurement of the outer cylindrical contour of the elastic helical hone; b) the area of measurement of the outer cylindrical contour of the elastic helical hone**
**Figure 4. Carl Zeiss CONTURA Coordinate Measuring Machine**

## Conclusions

Consequently, as a result of the study, it was discovered that the actual growth of the diameter has maximum value inside the elastic helical hone with a moderate decrease to the ends, forming a barrel-shaped form, with the value of the difference being within 5 microns by the results of measurement and does not affect its

performance, taking into account the proposed methodology preparation for the exploitation.

Development of the method of preparation for the exploitation became possible due to the study of the mechanics of contact interaction the elastic helical hone and the treated surface.

**References**

1. Scherbyna K. Force depiction of the radial change in the helical spring hone / K. Scherbyna // Herald of the Khmelnitsky National University: Technical Sciences. – Khmelnytsky : KhNU, 2016. – Issue 2 (235). – P. 149–155.

2. Fritz Klocke. Manufacturing processes. Grinding honing, lapping / RWTH AACHEN University / RWTH edition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

3. Certificate of authorship No. 563275. МКИ B 24 B 33/00. The tool for diamond abrasive treatment / R.G. Kudoyarov, Yu.B. Serebrennik – Published in 1971, Bull. No. 29.

4. Method of precision machining of cylinders holes in internal combustion engine and diamond reamer for its realization: Patent No. 2120369, Russia. MPK B23 D 77/00, B24B 33/00. / Grafchev A.P., Sekretova E.P., Pisklyukov V.I.; Applicant and holder is Open Joint-Stock Company GAZ. - No. 97113903/02; Certificate, August 11, 1997; published 10.20.1998. – 3 p.

5. Fragin I. E. New Honing. / I.E. Fragin – M.: Machine-building, 1980. – 95 p.

6. Podgaetskiy M.M. Peculiarities of processing of precision holes by elastic helical hone / M.M. Podgaetskiy, K.K. Shcherbina // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University "Mechanical Engineering, Materials Science". – 2013. – T. 15 No. 2. – P. 30–39.

Рецензія/Peer review : 22.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кіріченко А.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-21-30
УДК 681.513

О.О. БРОВАРЕЦЬ
Київський кооперативний інститут бізнесу і права
В.П. КОВБАСА, О.В. ЦУРКАН
Вінницький національний аграрний університет

# ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДО ПИТАННЯ ПРО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ХОДІ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОРОЗПУШЕННЯ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА У КОНТЕЙНЕРІ. ЧАСТИНА 2

*Сучасне землеробство передбачає виконання певної технологічної операції, згідно з відповідною картограмою-завданням, яка розробляється попередньо на основі різнопланової інформації. Знання певної структури варіабельності ґрунтового покриву, отриманої з використанням інформаційно-технічних систем локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь, дозволяє прийняти ефективні оперативні рішення для ефективного управління агробіологічним потенціалом сільськогосподарських угідь. Очевидно, що за таких умов виникає необхідність у принципово нових підходах до ведення агропромислового виробництва, що полягає у забезпеченні належної якості виконання технологічних операцій. Якість виконання технологічних операцій є інтегральним показником ефективності виробництва сільськогосподарської продукції в межах агробіологічного поля. Поставлене завдання досягається шляхом використання інформаційно-технічної системи оперативного моніторингу стану ґрунтового середовища конструкції для визначення електропровідних характеристик ґрунтового середовища. Необхідна якість виконання основних технологічних процесів у рослинництві забезпечується за рахунок інтегрованих інформаційно-технічних систем оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь, що вимагає додаткових досліджень у напрямку впливу параметрів і режимів віброзбудження інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу на зміну густини сипкого середовища при різних його властивостях, а також компонент швидкостей його руху, побудованих регресійних залежностей, які поєднують вказані величини. Потрібне проведення аналізу досліджень та динаміки системи контейнер – сипке середовище. Метою цього дослідження є побудова отримання вихідних рівнянь динаміки сипкого середовища та зміни його густини у процесі коливань середовища.*

***Ключові слова:*** *інформаційно-технічна система, локальний оперативний моніторинг, ґрунт, проби, варіабельність, величина, дослідження.*

O. BROVARYTS
Kyiv Cooperative Institute of Business and Law
V.P. KOVBASA, O.V. TSURKAN
Vinnytsia National Agrarian University

## DESIGN AND ANALYSIS OF THE COMPUTATIONAL ALGORITHM IN THE IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES TO THE DECISION MAKING DECISION FOR THE MODERNIZATION OF VIBRATION DAMPING OF THE SINGLE ENVIRONMENT IN THE CONTAINER. PART 2

*Modern agriculture involves the implementation of a particular technological operation, according to the appropriate map-task, which is developed pre-based on diverse information. Knowledge of a certain structure of soil cover variability, obtained using information and technical systems of local operational monitoring of the agrobiological state of agricultural lands, allows us to adopt effective operational decisions for efficient management of agrobiological potential of agricultural lands. Obviously, under such conditions, there is a need for fundamentally new approaches to agricultural production, which is to ensure the proper quality of technological operations. The quality of the implementation of technological operations is an integral indicator of the efficiency of production of agricultural products within the agrobiological field. The task is achieved by using the information and technical system of operational monitoring of the soil environment of the structure to determine the conductive characteristics of the soil environment. Necessary quality of implementation of basic technological processes in crop production is ensured by the integrated information and technical systems of operational monitoring of the agrobiological state of agricultural lands, which requires additional research in the direction of influencing the parameters and modes of vibration development of the information-technical system of local operative monitoring to change the density of friable medium with its various properties , as well as a component of its velocities, regressive dependencies are constructed that combine the order no sizes. Demands analysis of the research and dynamics of the container system - friable environment. The purpose of this study is to construct the initial equations of the dynamics of the friable medium and to flush its density in the processes of oscillation of the medium.*

*Key words: information and technical system, local operational monitoring, soil, samples, variability, size, research.*

**Постановка проблеми**. В першій частині був наведений аналіз стану досліджень коливання сипкого середовища у обмеженому твердими стінками контейнері. В результаті проведених досліджень встановлені статичні умови напруженого стану сипкого середовища у нерухомому стані, тобто до початку прикладання до контейнера вимушених коливань.

**Метою цього дослідження** є побудова отримання вихідних рівнянь динаміки сипкого середовища та зміни його густини у процесі коливань середовища.

**Виклад основного змісту дослідження.** Ця частина присвячена отриманню вихідних рівнянь руху сипкого середовища та зміни його густини (порожнистотсі) у процесі коливань контейнера.

Для аналізу зв’язку вимушених коливань коливних навантажень зі змінами густини сипкого середовища, компонентами швидкостей його переміщень, змінами напружень в ньому необхідно розв’язати

такі задачі:

вивести кінематичні рівняння вимушуючої дії на робочу камеру;

отримати рівняння для визначення компонент швидкостей переміщень елементарних об'ємів сипкого середовища;

отримати рівняння зміни компонент напружень в елементарних об'ємах сипкого середовища.

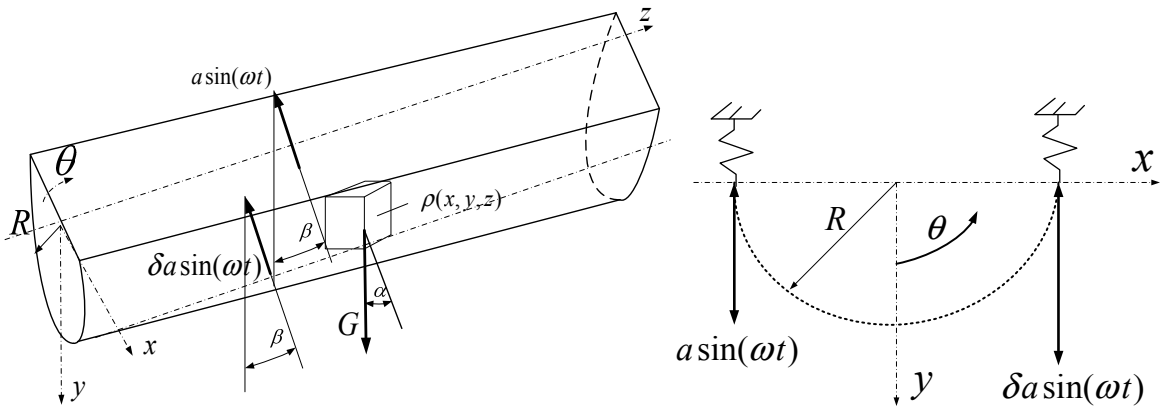



**Рис. 1. Схема збудження коливань сипкого середовища у робочій камері вібраційної машини та схема приведення робочої камери у коливний рух**

Робоча камера із сипким середовищем має форму циліндра радіусом $R$, вісь якої нахилена до горизонтальної осі $z$ під кутом $\alpha$. До периферійних зон циліндра прикладені зосереджені сили з переміщеннями, які викликають коливання. Для забезпечення більш повної свободи для більш загальних випадків вимушуючи дія прикладена під кутом $\beta = \lambda$ до вертикалі в площині $xz$. Ці переміщення представлені на схемі функціями (із врахуванням нахилу $\beta$):

Проекція на вісь $oy$, при $x = -R$ та $x = R$

$y_1 = \rho a \sin(\omega t)\cos(\lambda); y_2 = \rho \delta a \sin(\omega t)\cos(\lambda)$, а при розподілі дії вздовж осі $ox$ від координати $-R$ до $R$:

$$y = a\left(1 + (R + x)\frac{\delta - 1}{2}\right)\sin(\omega t)\cos(\lambda), \quad (1)$$

де $\alpha$ – амплітуда коливань;

$\delta$ – коефіцієнт, який враховує різницю амплітуд коливань двох протилежних країв робочої камери;

$\omega$ – кутова частота коливань;

$t$ – час;

$\rho$ – густина сипкого середовища.

При різниці амплітуд коливань, яка пропорційна коефіцієнту $\delta$ виникають кутові коливання робочої камери (навколо осі симетрії):

$$\theta = arctg\left[\delta / R\right]\sin\left[\omega t\right]\cos\left[\lambda\right] \quad (2)$$

Вигляд напружено-деформованого стану елемента сипкого середовища наведений на рис. 2.

З метою отримання рівнянь компонент швидкостей переміщень сипкого середовища необхідно рівняння з частини 1 (3) підставити в рівняння (6), а отримані компоненти напружень підставити в рівняння динаміки сипкого середовища (1). В кінцевому вигляді такі рівняння набудуть найбільш загального виду:

$$\rho\left(\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + W\frac{\partial U}{\partial z}\right) =$$

$$= F_x + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\left(\frac{\partial U}{\partial x} - \nu\left(\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial W}{\partial z}\right)\right)\right) -$$

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right)\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\eta\left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)\right);$$

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+W\frac{\partial V}{\partial z}\right)=$$
$$=F_y+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\left(\frac{\partial V}{\partial y}-\nu\left(\frac{\partial V}{\partial y}-\frac{\partial U}{\partial x}-\frac{\partial W}{\partial z}\right)\right)\right)- \quad (3)$$
$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\left(\frac{\partial V}{\partial z}+\frac{\partial W}{\partial y}\right)\right),$$

де $F_x, F_y, F_z$ – проекції масової сили на осі координат;

$U, V, W$ – компоненти швидкостей елементарних об'ємів сипкого середовища;

$\rho$ – густина сипкого середовища;

$\eta$ – зсувна в'язкість середовища;

$\nu$ – коефіцієнт бічного розширення (аналог коефіцієнта Пуассона).

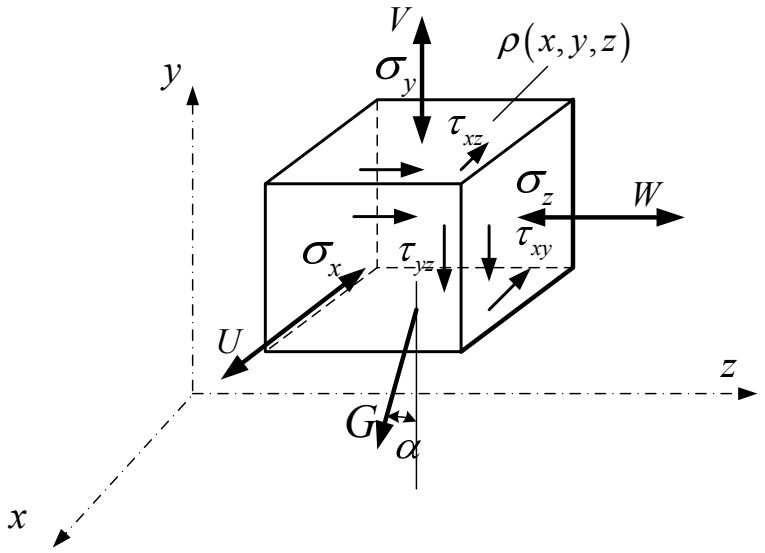



**Рис. 2. Вигляд напружено-деформованого стану елемента сипкого середовища під дією прикладених коливальних рухів**

Ці рівняння повинні бути доповнені рівнянням нерозривності:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\left(+\frac{\partial(\rho U)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho W)}{\partial z}\right)=0. \quad (3.a)$$

Це рівняння, в свою чергу, повинне бути перетворене з використанням рівнянь розподілу напружень в статичному стані (11 або 12) та введенням на основі їх функції розподілу густини із використанням.

Далі, при використанні граничних умов можна визначити компоненти швидкостей переміщень і зміни густини сипкого середовища при прикладенні вимушуючих рухів до стінок робочої камери.

Розв'язок цих рівнянь може бути отриманий лише з використанням чисельних методів кінцевих елементів (FEM) або кінцевих об'ємів (DEM), оскільки ці рівняння відносяться до гіперболічного типу з геометричною і фізичною нелінійностями [12].

Інерційні складові визначаються прискореннями (лінійними і кутовими) в проекціях на нормаль і дотичну до стінки робочої камери в функціях збудження і координат стінки робочої камери залежно від виду переміщень лінійних (маса) чи кутових (момент інерції мас). Виходячи із схеми (рис. 1) зміщення стінок робочої камери в напрямі осі $oy$ будуть мати вигляд:

$$y=a\left(1+(R+x)\frac{\delta-1}{2}\right)\sin(\omega t)\cos(\lambda);$$

- його перша похідна по часу (лінійна швидкість):

$$V=\dot{y}=a\left(1+\frac{1}{2}(R+x)(-1+\delta)\right)\omega cos[\lambda]cos[t\omega]; \quad (4)$$

- друга похідна по часу (лінійне прискорення):

$$\dot{V} = \ddot{y} = -a\left(1 + \frac{1}{2}(R+x)(-1+\delta)\right)\omega^2 cos[\lambda]\sin[t\omega]. \quad (5)$$

До рівнянь (3), (3.а), (14, ч.1) необхідно додати граничні умови, тобто умови на поверхні стінок робочої камери. Ці граничні умови мають вигляд:

$$\text{При } (U = V = W)\Big|_{\substack{t=0,\\ x=y=R}} = 0 \; ; \; \rho\Big|_{t=0} = \rho_0$$

На вільній поверхні сипкого середовища в контейнері приймається умова для вільної поверхні, при якій:

$$(U = V = W)\Big|_{\substack{t=0,\\ x=\sqrt{R^2-y^2}}} = \left\{U_{x=\sqrt{R^2-y^2}}; V_{x=\sqrt{R^2-y^2}}; W_{x=\sqrt{R^2-y^2}}\right\}$$

$\rho\Big|_{x=\sqrt{R^2-y^2},t=0} = \rho_{x=\sqrt{R^2-y^2}}$, тобто умова поверхні, яка не обмежує можливий рух і не суттєво впливає на переміщення середовища на вільній поверхні.

Для замикання системи рівнянь (3), (3.а) необхідно ввести змінну величину модуля в'язкості сипкого матеріалу. Змінна величина в'язкості сипкого середовища дозволяє розширити можливість використання розв'язків, особливо для випадків зміни властивостей внаслідок зменшення густини частинок сипкого середовища (наприклад в процесі зневоложення). Для цього необхідно спочатку ввести функцію густини матеріалу $\rho$. Ця величина пов'язана з коефіцієнтом пористості сипкого матеріалу $k$ та густиною окремих часток наступною залежністю:

$$k = \rho[x,y,z,t]/\gamma[\gamma_0, W, t],$$

де $\rho[x,y,z,t]$ – змінна в процесі сушіння густина окремої частки сипкого матеріалу;

$\gamma[\gamma_0, W, t]$ – густина частки при певній вологості $W$.

Виходячи з результатів попередніх експериментальних досліджень величина модуля в'язкості зсувних деформацій може бути представлена залежністю:

$$\eta = a(b(k\ \gamma - \gamma_0)^2 - c)\ \ k = \rho/\gamma, \quad (6)$$

де $a, b, c$ – емпіричні коефіцієнти;

$\gamma_0$ – густина частки, що відповідає вологості $W_k$, при якій модуль в'язкості набуває найбільшого значення.

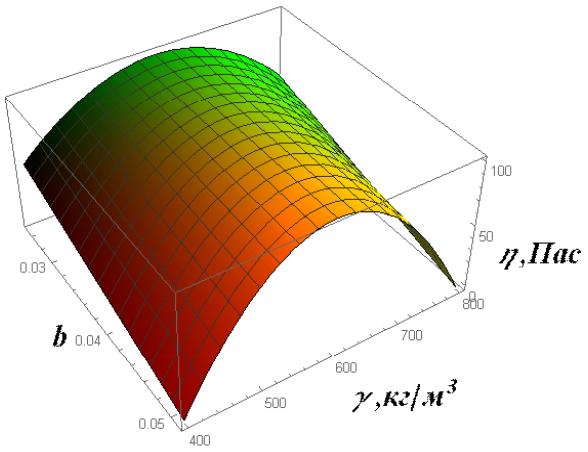



**Рис. 3. Графічне зображення вигляду функції (6)**

Виходячи з рівняння (14, ч.1), та враховуючи те, що величина $\sigma_1 = \sigma_y = y\,g\,\rho_0 = P_0$ є гідростатичним тиском сипкого середовища, в початковому положенні системи, тобто до збудження коливань, який залежить від механічних властивостей (початкової густини) і координат точки розміщення, в якій визначається цей тиск, рівняння (14) може бути переписане у вигляді функції тиску $P$:

$$\rho = \rho_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} b \sqrt{\left(\left(1 + \frac{\tau_0 + P\,tg[\varphi]}{P\left(tg[\varphi] + \sqrt{1 + tg[\varphi]}\right)}\right)\left(P + 2P\left(1 - 2\frac{\tau_0 + P\,tg[\varphi]}{P\left(tg[\varphi] + \sqrt{1 + tg[\varphi]}\right)}\right)\right)\right)} \quad (7)$$

Функції вільних членів рівнянь (3) а $F_x, F_y, F_z$: це деякі складові виразу з вимушуючої дії і масових сил.

Внаслідок використання позначень $\alpha, \beta$ як внутрішніх функцій моделі в Comsol, слід змінити позначення кутів нахилу вимушуючої сили до осі $oy$ в площині $zoy$ $\beta = \lambda$, $\alpha = \theta$ – кут нахилу осі циліндра до осі $oz$ в площині $yoz$.

Масова сила:

$$F_{ym} = \rho\, g \cos[\theta]; F_{zm} = \rho\, g \sin[\theta]; F_{xm} = 0.$$

Вимушуюча сила повинна бути виражена через прискорення, яке створюється приводом та діє на робочу камеру. При цьому вважаємо, що вимушуюча сила може бути прикладена двома незалежними віброзбуджувачами (рис. 1). У відповідності до схеми обидві вимушуючі сили направлені під кутом $\beta = \lambda$ до вертикальної осі $oy$. Проекція прискорення на вісь $oy$, при $x = -R$ і $x = R$:

$$\dot{V} = \ddot{y} = -a\left(1 + \frac{1}{2}(R + x)(-1 + \delta)\right)\omega^2 cos[\lambda]\sin[t\omega]$$

В проекціях на осі $ox, oz$ прискорення вимушуючої сили набудуть вигляду:

$$\dot{W} = \ddot{z} = -a\left(1 + \frac{1}{2}(R + x)(-1 + \delta)\right)\omega^2 \sin[\lambda]\sin[t\omega];$$

$$\dot{U} = \ddot{x} = -a\, tg\left[a\frac{\delta - 1}{2R}\right]\left(1 + \frac{1}{2}(R + x)(-1 + \delta)\right)\omega^2 cos[\lambda]\sin[t\omega]. \quad (8)$$

Таким чином, вимушуюча сила разом з масовими силами представлена наступними виразами:

- в проекції на вісь $oy$:

$$F_y = -\rho\left(a\left(1 + \frac{1}{2}(R + x)(-1 + \delta)\right)\omega^2 cos[\lambda]\sin[t\omega] + g\cos[\theta]\right);$$

- в проекції на вісь $oz$:

$$F_z = -\rho\left(a\left(1 + \frac{1}{2}(R + x)(-1 + \delta)\right)\omega^2 \sin[\lambda]\sin[t\omega] + g\sin[\theta]\right); \quad (9)$$

- в проекції на вісь $ox$:

$$F_x = -\rho\, a\, tg\left[a\frac{\delta - 1}{2R}\right]\left(1 + \frac{1}{2}(R + x)(-1 + \delta)\right)\omega^2 cos[\lambda]\sin[t\omega].$$

В зв'язку з тим, що в рівняння, які описують рух сипкого середовища входить аргумент часу, то необхідно при чисельному розв'язку врахувати максимально можливий крок ітерацій по часу та визначити кінцеву межу інтегрування таким чином, щоб отримати максимальні і мінімальні значення шуканих величин, які, виходячи з граничних умов, мають періодичний характер.

Враховуючи періодичність вимушуючої сили, період якої $T = 2\pi/\omega$, то максимальний крок інтегрування повинен бути на порядок меншим періоду, тобто $n_T = 2\pi/(10\omega)$. В зв'язку з дуже великим об'ємом обрахунків при чисельному розв'язку системи рівнянь можна прийняти дискретизацію, яка дорівнює максимально можливому значенню. Для отримання значень шуканих функцій, які відповідають максимальним і мінімальним значенням, необхідно вибрати кінцевий інтервал інтегрування

близький до мінімума і максимума вимушуючих функцій. При цьому запізненням при передачі імпульсів можна знехтувати. Тому шукані функції будуть набувати максимальних і мінімальних значень при $t_{\max} = k(T + 1/4T)$, $t_{\min} = k(T + 3/4T)$. В процесі моделювання прийняті такі кінцеві значення інтервалів інтегрування.

Для аналізу впливу всіх керованих факторів, необхідно побудувати план проведення чисельного експерименту, із можливістю врахування всіх можливих варіантів їх впливу на величини кінцевих значень вектору швидкості $\mathbf{U}$ і густини $\boldsymbol{\rho}$ сипкого середовища в робочій камері, яка виконує коливні рухи при різних значеннях модуля в'язкості $\eta(\rho, \gamma_0)$. При цьому, повинні бути враховані величини кінцевих значень інтегрування для отримання максимальних і мінімальних значень векторів $\mathbf{U}$ і $\boldsymbol{\rho}$.

Слід також врахувати те, що зміна загальної густини сипкого середовища відбувається за рахунок збільшення об'єму пор. Ці пори заповнені атмосферним повітрям, густина якого дуже мала в порівнянні із густиною часток сипкого середовища. Тому навіть незначна зміна загальної густини середовища при практично постійній величині густини часток вказує на значне підвищення пористості сипкого середовища.

Якщо прийняти до уваги те, що густина повітря за природніх умов рівна 1,2-1,3 кг/м$^3$, то можна виконати наступні перетворення для розуміння змін густини об'єму сипкого середовища.

Різниця густини середовища в початковому стані та після прикладених вимушуючих дій може бути виражена наступним чином:

$$\Delta\rho = \rho_0 - \rho = \frac{(m_s + m_{a0})}{(V_s + V_{a0})} - \frac{(m_s + m_a)}{(V_s + V_a)}, \tag{10}$$

де $\rho_0, \rho$ – загальна густина сипкого середовища в початковому стані та після прикладення вимушуючих сил;

$m_s, m_{a0}, m_a$ – маса твердих часток сипкого середовища в об'ємі, який розглядається, маса повітря в початковому стані і маса повітря в кінцевому об'ємі сипкого середовища, відповідно;

$V_s, V_{a0}, V_a$ – об'єм часток сипкого середовища, об'єм пор в початковому стані, об'єм пор в кінцевому стані, відповідно.

Враховуючи те, що маса повітря мала, то нею можна знехтувати, тоді після деяких перетворень можна отримати залежність зміни пористості сипкого середовища, виходячи з того, що пористість $k = V_a / (V_a + V_s)$ у вигляді:

$$\Delta k = k - k_0 = \frac{V_{a0}}{V_{a0} + V_s} - \frac{(V_{a0} + V)^2 \Delta\rho}{-m_s + (V_{a0} + V_s)\Delta\rho} \tag{11}$$

Наведена вище залежність може використовуватися для визначення зміни пористості сипкого середовища при різних режимах вібрацій робочої камери.

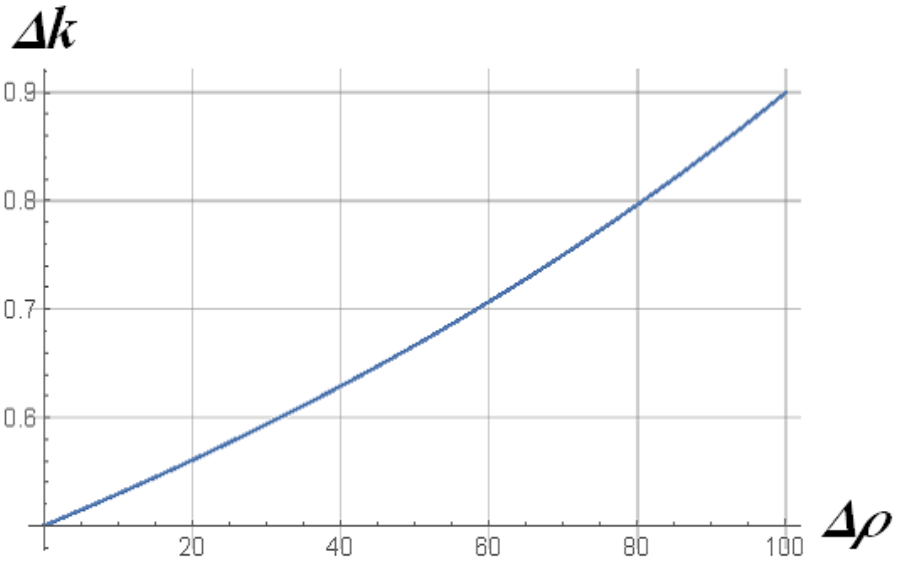



**Рис. 4. Зміна густини середовища залежно від зміни пористості сипкого середовища**

Розв'язати систему рівнянь (3), (3.а) разом з (9) при граничних умовах наведених вище дозволяє застосувати метод кінцевих елементів. Оскільки в більшості прикладних пакетів відсутня можливість використання користувацьких рівнянь, то можна скористатись програмним комплексом Comsol Multiphysics [10], який являє собою комплексно інтегроване середовище для моделювання складних технічних систем зі всіма різноманітними процесами, які протікають у цих системах і чисельного розв'язку таких складних задач.

На першому етапі моделювання, не вводячи функцію зміни модуля в'язкості, а задаючи її як дискретно змінювану величину алгоритм чисельного моделювання з використанням методу кінцевих елементів FEM в середовищі Comsol Multiphysics [10, 11] може бути представлений наступним алгоритмом.

Вихідну нелінійну систему рівнянь (3) – (3.а) можна представити у вигляді системи:

$$e_a \frac{\partial \vec{\Pi}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \vec{\Pi}}{\partial t} + \nabla \Gamma = \vec{f},$$

$$\Gamma = -\begin{pmatrix} \{-\rho U, -\rho V, -\rho W\} \\ \begin{Bmatrix} \frac{2\eta(-1+\nu)}{-1+2\nu}\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2\eta\nu}{-1+2\nu}\frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2\eta\nu}{-1+2\nu}\frac{\partial W}{\partial z}; \\ \eta\frac{\partial U}{\partial y} + \eta\frac{\partial V}{\partial x}; \eta\frac{\partial U}{\partial z} + \eta\frac{\partial W}{\partial x}; \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \eta\frac{\partial U}{\partial y} + \eta\frac{\partial V}{\partial x}; \\ \frac{2\eta(-1+\nu)}{-1+2\nu}\frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2\eta\nu}{-1+2\nu}\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2\eta\nu}{-1+2\nu}\frac{\partial W}{\partial z}; \\ \eta\frac{\partial V}{\partial z} + \eta\frac{\partial W}{\partial y}; \end{Bmatrix}; \\ \begin{Bmatrix} \eta\frac{\partial U}{\partial z} + \eta\frac{\partial W}{\partial x}; \eta\frac{\partial V}{\partial z} + \eta\frac{\partial W}{\partial y}; \\ \frac{2\eta(-1+\nu)}{-1+2\nu}\frac{\partial W}{\partial z} - \frac{2\eta\nu}{-1+2\nu}\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2\eta\nu}{-1+2\nu}\frac{\partial V}{\partial y}; \end{Bmatrix} \end{pmatrix}; \vec{f} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_{mx} \\ F_{my} \\ F_{mz} \end{Bmatrix}$$

де $\vec{\Pi}$ – вектор невідомих, $\Gamma$ – потік, $e_a, d_a$ – відповідно матриці розмірності $4\times 4$.

В такому вигляді вихідні рівняння будуть програмуватися в Comsol Multiphysics, що дозволить суттєво підвищити глобальну стійкість задачі. Нехай, для простоти прийняті позначення функції, які входять в (3) і (3.а) та містять динамічну в'язкість, а також коефіцієнт поперечного розширення як функцію $A_{ij}(\rho(P))$ для членів, що входять в лапласіан і $C_i(\rho(P))$ – для змішаних похідних.

$$\begin{pmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial U}{\partial x}; -\nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial U}{\partial x}; \nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial V}{\partial y}; \nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial W}{\partial z}; \\ -\eta\frac{\partial U}{\partial y}; -\eta\frac{\partial V}{\partial x}; -\eta\frac{\partial U}{\partial z}; -\eta\frac{\partial W}{\partial x} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial V}{\partial y}; -\nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial V}{\partial y}; \nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial U}{\partial x}; \nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial W}{\partial z}; \\ -\eta\frac{\partial U}{\partial y}; -\eta\frac{\partial V}{\partial x}; -\eta\frac{\partial V}{\partial z}; -\eta\frac{\partial W}{\partial y} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial W}{\partial z}; -\nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial W}{\partial z}; \nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial U}{\partial x}; \nu\frac{2\eta}{(-1+2\nu)}\frac{\partial V}{\partial y}; \\ -\eta\frac{\partial U}{\partial z}; -\eta\frac{\partial W}{\partial x}; -\eta\frac{\partial V}{\partial z}; -\eta\frac{\partial W}{\partial y} \end{Bmatrix} \end{pmatrix} =$$

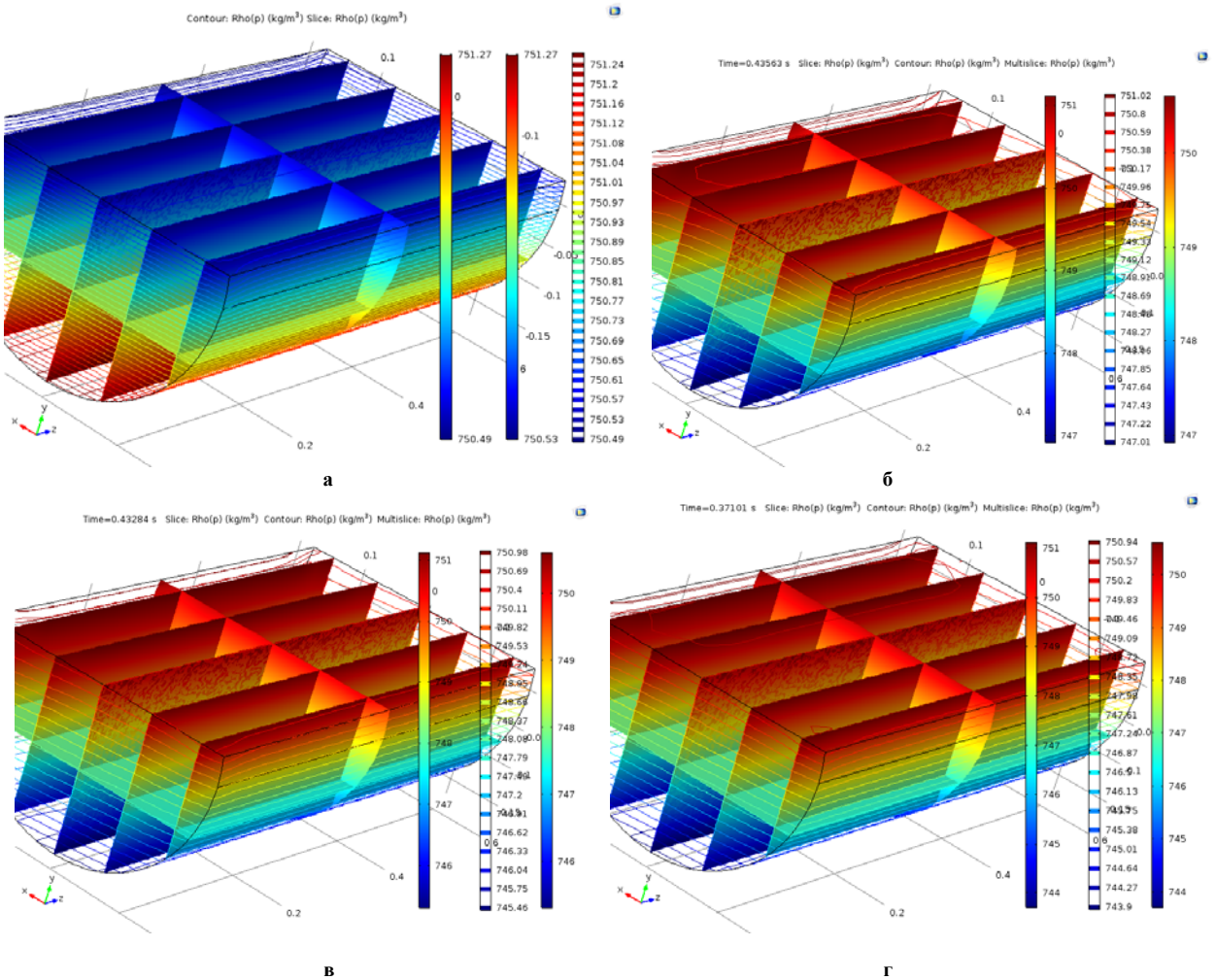
$$= \begin{pmatrix} \left\{ A_{11}\frac{\partial U}{\partial x}; A_{12}\frac{\partial U}{\partial x}; A_{13}\frac{\partial V}{\partial y}; A_{14}\frac{\partial W}{\partial z}; C_1\frac{\partial U}{\partial y}; C_1\frac{\partial V}{\partial x}; C_1\frac{\partial U}{\partial z}; C_1\frac{\partial W}{\partial x} \right\} \\ \left\{ A_{21}\frac{\partial U}{\partial x}; A_{22}\frac{\partial V}{\partial y}; A_{23}\frac{\partial V}{\partial y}; A_{24}\frac{\partial W}{\partial z}; C_2\frac{\partial U}{\partial y}; C_2\frac{\partial V}{\partial x}; C_2\frac{\partial V}{\partial z}; C_2\frac{\partial W}{\partial y} \right\} \\ \left\{ A_{31}\frac{\partial U}{\partial x}; A_{32}\frac{\partial V}{\partial y}; A_{33}\frac{\partial W}{\partial z}; A_{34}\frac{\partial W}{\partial z}; C_3\frac{\partial U}{\partial z}; C_3\frac{\partial W}{\partial x}; C_3\frac{\partial V}{\partial z}; C_3\frac{\partial W}{\partial y} \right\} \end{pmatrix} \quad (12)$$

В розрахунковій моделі аргументи для цих функцій задаються у вигляді:

$$A_{i,j} = A_{i,j}(\alpha[\rho - \overline{\rho}] + \overline{\rho})$$
$$C_i = C_i(\beta[\rho - \overline{\rho}] + \overline{\rho}) \quad ,$$

у випадку $\begin{cases} \alpha = 1 \\ \beta = 1 \end{cases}$ реалізується модель, яка описана системою (12), величина $\overline{\rho}$ - може приймати будь-яке значення.

Отримані аналітичні залежності можуть використовуватись для визначення тиску сипкого середовища на стінки робочих камер, а також визначення початкових умов руху сипкого середовища при його вивантаженні.




**а** **б** **в** **г**

**Рис. 5. Графіки розрідження сипкого середовища при амплітуді коливань $a = 0,01\,м$, кутових швидкостях $\omega = 75, 90, 105$ рад/с, кутах $\lambda = 0, \theta = 0$, початковій насипній густині $\rho = 750\,кг/м^3$, коефіцієнті пропорційності амплітуд коливань $\delta = 1$, в проміжки часу а, в, д - $t = 0$, б, г, е - $t = 10,5\,\pi\,/\,\omega, c$**

Важливе значення ці залежності мають також при аналітичному визначенні умов склепоутворення над вивантажувальними отворами споруд та робочих камер для зберігання сипких середовищ.

Деякі з результатів чисельного моделювання зміни густини сипкого середовища та компонент швидкостей переміщень його об'ємів наведено на рис. 5, 6. Ввесь подальший аналіз результатів чисельних розв'язків буде виконуватися на основі аналізу графічної інтерпретації отриманих результатів, оскільки всі вони носять просторовий характер тобто є функціями координат тривимірного простору і функції часу. Виходячи з цього проаналізувати різницю в отриманих розв'язках для характерних точок простору і у визначений момент часу співставляючи чисельні значення неможливо.

Аналіз характеру розподілу насипних густин сипкого середовища при прикладанні коливань до робочої камери з різними кутовими швидкостями свідчить про те, що насипна густина в нижній зоні робочої камери зменшується в порівнянні із статичним станом. При цьому зменшення густини зростає із збільшенням кутових швидкостей. Слід врахувати, що незначне зменшення насипної густини відбувається за рахунок збільшення об'єму повітря в сипкому середовищі. Тому зміну пористості необхідно визначати з використанням рівняння (11).

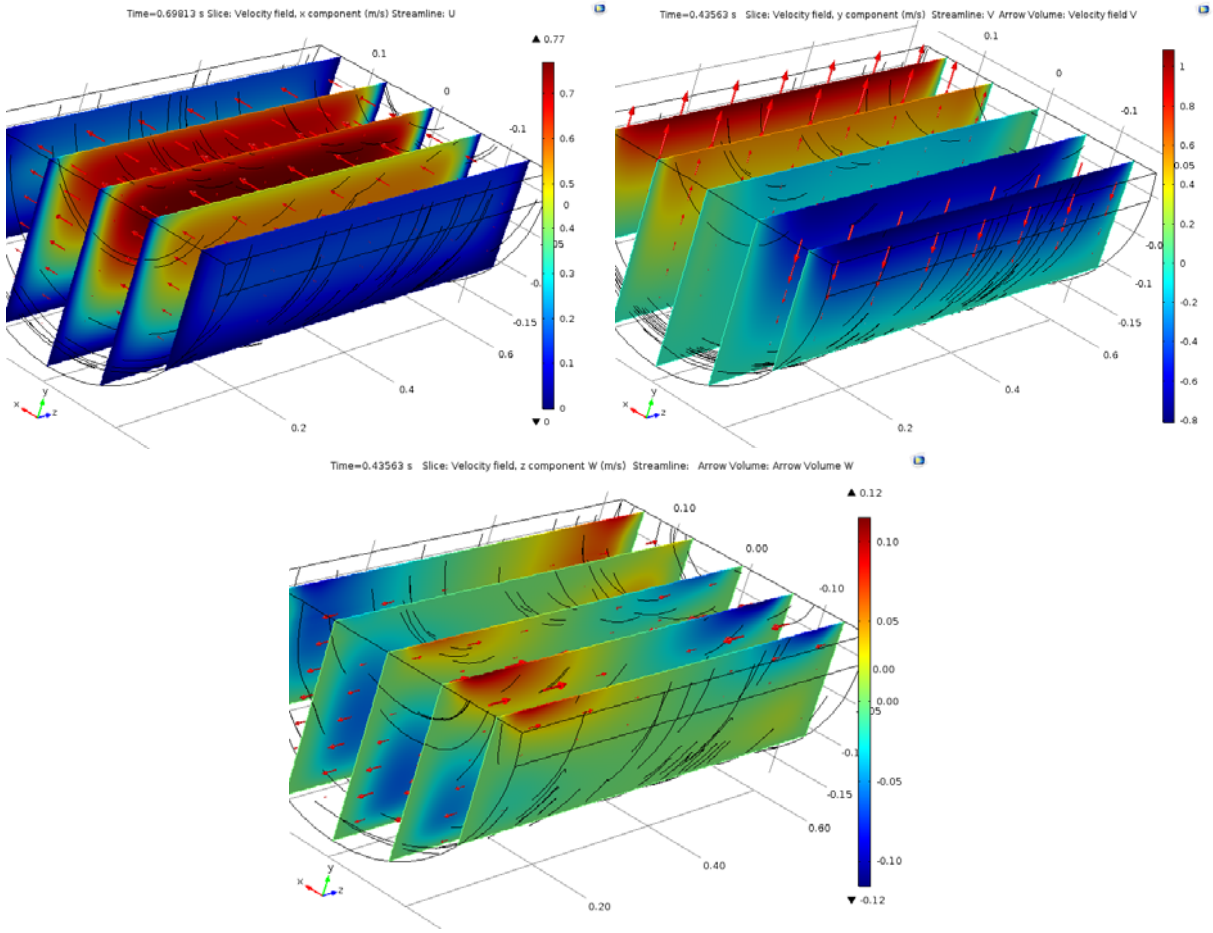



**Рис. 6. Графіки ліній вектору швидкості руху сипкого середовища $\mathbf{U}$ і проекцій вектору швидкості $U, V, W$ величин при амплітуді коливань $a = 0,01$ м, кутовій швидкості $\omega = 75$ рад/с, кутах $\lambda = 0, \theta = 0$, початковій насипній густині $\rho = 750$ кг/м$^3$, коефіцієнті пропорційності амплітуд коливань $\delta = 1$, при часі $t = 10,5\ \pi\ /\ \omega, c$**

**Висновки**

Аналіз характеру розподілу компонент вектору швидкості $\mathbf{U}$ сипкого середовища при прикладанні коливань до робочої камери з різними кутовими швидкостями свідчить про те, що максимальні значення компонент цього вектору швидкості не перевищують компонент швидкостей руху стінок коливної робочої камери, що відповідає умовам відсутності ефективного розрідження середовища, оскільки в більшій частині об'єму сипкого середовища, яке знаходиться в робочій камері не перевищує величину критерія Фруда. Звідси випливає, що режими руху сипкого середовища при таких параметрах не можуть забезпечити умову розрідження середовища в робочій камері.

**Література**

1. Федоренко И.Я., Пирожков Д.Н. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии : монография. Барнаул, 2006. 166 с.

2. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике. Москва, 1988. 208 с.

3. Блехман И.И. Вибрационная механика. Москва, 1994. 400 с.

4. Ковбаса В.П., Ярошенко В.В. Розподіл напружень у сипкому середовищі, обмеженому стінками споруди силосного типу // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кіровоград, 2010. Вип. 40, ч. 1. С. 314–324.

5. Ковбаса В.П., Швайко В.М., Гуцол О.П. Механіка сільськогосподарських матеріалів і середовищ. Київ-Ніжин, 2015. 536 с.

6. Ковбаса В.П. До визначення фізичних рівнянь пружно-в`язко-пластичного середовища з умовою руйнування за модифікованим критерієм Кулона-Мора // Праці ТДАТУ. Мелітополь, 2011. Вип. 11, т. 2. С. 161–174.

7. Ковбаса В.П., Солона О.В., Спірін А.В. та ін. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця, 2018. № 1 (100). С. 44–49.

8. Блехман И.И. Вибрационное взвешивание твердых тел в жидкости и сыпучей среде // Вестник ПНИПУ. Механика. Пермь, 2013. № 2. С. 52–83.

9. Blekhman I.I., Blekhman L.I., Sorokin V.S. and oth. Surface and volumetric effects in a fluid subjected to high-frequency vibration. *Journal of Mechanical Engineering Science*. London, 2012. Vol. 226 (№ 8). P. 2028–2043.

10. COMSOL Multiphysics. Burlington, 2018. URL: http://www.comsol.com (10.08.2018).

11. Горбунов В.А. Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB. Иваново, 2008. 216 с.

12. Цуркан О.В., Ковбаса В.П. Формализация колебательного движения сыпучей дискретной среды в колеблющейся емкости // Інженерія та технології: наука, освіта, виробництво : праці Міжнар. наук.-техн. конф. (Луцьк, 15-16 лист. 2018). Луцьк, 2018. С. 266–269.

**References**

1. Fedorenko I.Ya., Pirozhkov D.N. Vibriruemyj zernistyj sloj v selskohozyajstvennoj tehnologii : monografiya. Barnaul, 2006. 166 s.

2. Blehman I.I. Chto mozhet vibraciya?: O «vibracionnoj mehanike» i vibracionnoj tehnike. Moskva, 1988. 208 s.

3. Blehman I.I. Vibracionnaya mehanika. Moskva, 1994. 400 s.

4. Kovbasa V.P., Yaroshenko V.V. Rozpodil napruzhen u sypkomu seredovyshchi, obmezhenomu stinkamy sporudy sylosnoho typu // Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Kirovohrad, 2010. Vyp. 40, ch. 1. S. 314–324.

5. Kovbasa V.P., Shvaiko V.M., Hutsol O.P. Mekhanika silskohospodarskykh materialiv i seredovyshch. Kyiv-Nizhyn, 2015. 536 s.

6. Kovbasa V.P. Do vyznachennia fizychnykh rivnian pruzhno-v`iazko-plastychnoho seredovyshcha z umovoiu ruinuvannia za modyfikovanym kryteriiem Kulona-Mora // Pratsi TDATU. Melitopol, 2011. Vyp. 11, t. 2. S. 161–174.

7. Kovbasa V.P., Solona O.V., Spirin A.V. ta in. Pro sproshchennia kryteriiu vyhliadu napruzheno-deformovanoho stanu sutsilnoho seredovyshcha // Vseukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Tekhnika, enerhetyka, transport APK». Vinnytsia, 2018. № 1 (100). S. 44–49.

8. Blehman I.I. Vibracionnoe vzveshivanie tverdyh tel v zhidkosti i sypuchej srede // Vestnik PNIPU. Mehanika. Perm, 2013. № 2. S. 52–83.

9. Blekhman I.I., Blekhman L.I., Sorokin V.S. and oth. Surface and volumetric effects in a fluid subjected to high-frequency vibration. Journal of Mechanical Engineering Science. London, 2012. Vol. 226 (№ 8). P. 2028–2043.

10. COMSOL Multiphysics. Burlington, 2018. URL: http://www.comsol.com (10.08.2018).

11. Gorbunov V.A. Modelirovanie teploobmena v konechno-elementnom pakete FEMLAB. Ivanovo, 2008. 216 s.

12. Curkan O.V., Kovbasa V.P. Formalizaciya kolebatelnogo dvizheniya sypuchej diskretnoj sredy v koleblyushejsya emkosti // Inzheneriya ta tehnologiyi: nauka, osvita, virobnictvo : praci Mizhnar. nauk.-tehn. konf. (Luck, 15-16 list. 2018). Luck, 2018. S. 266–269.

Рецензія/Peer review : 22.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-31-34
УДК 629.7.01

А.Л. ГАНЗЮК, О.В. КРАВЧУК, О.О. КУДИНОВ, А.І. ГОРДЄЄВ
Хмельницький НДЕКЦ МВС України

# СПЕЦІАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ПРИВЕДЕННЯ В ДІЮ РЕАКТИВНИХ ГРАНАТОМЕТІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ НАДІЙНОГО СПРАЦЮВАННЯ

*Проведено аналіз роботи відомих пристроїв для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів з пострілами та визначено їх технічні недоліки. Запропоновано конструкцію спеціального пристрою для забезпечення безпечного ефективного дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів з метою безпечного встановлення їх спроможності до пострілу. З метою перевірки працездатності запропонованого пристрою було виготовлено діючу конструкцію спеціального пристрою і були проведені польові експериментальні відстріли.*

*Ключові слова: спеціальний пристрій, реактивні гранатомети.*

**A.L. HANZYUK, O.V. KRAVCHUK, O.O. KUDINOV A.I. HORDEEV**
**Khmelnytsky NDECTS of the MIA of Ukraine**

## SPECIAL DEVICE FOR DISTANCE ADJUSTMENT TO THE EFFECT OF REACTIVE GRENADE-GUN WITH PROVISION OF RELIABLE PROBLEM

*In carrying out court blasting and technical examinations, where research objects are industrial explosive devices or ammunition, which include rocket launchers, it is necessary to conduct expert experiments. They are carried out at landfills (subterranean sites) using special explosive equipment. Remote shooting is carried out under the conditions of full and comprehensive preliminary research of a rocket launcher and in the absence of signs of external interference in its design. The analysis of the work of known devices for remotely bringing into action of rocket grenade launchers with shots is carried out and their technical defects are determined. The construction of a special device for ensuring safe and effective remote control of the operation of rocket grenade launchers is proposed in order to safely establish their ability to shoot. In order to test the performance of the proposed device, an active design of a special device for remotely actuating reactive grenade launchers on the ability to work and explosion was manufactured and field experiments were carried out. It has been experimentally established that a special device for remotely actuating rocket launchers allows safe and efficient remote control of rocket launchers to safely determine their ability to fire.*

*Key words: special device, rocket launchers.*

## Вступ

Криміналістична вибухотехніка у своєму розвитку пройшла кілька етапів: перший етап – виникнення, накопичення емпіричного матеріалу і формування в самостійний вид досліджень (1942–1975). Цей етап починається з початком появи пороху, вибухових речовин та використання їх в злочинних цілях і триває до кінця 60-х рр. XX ст. Це етап активного розвитку, передусім природних і технічних наук, у взаємодії з якими поступово зароджувалася, формувалася і розвивалася криміналістика і разом з нею криміналістична вибухотехніка. Другий етап – становлення у вигляді сукупності ряду теоретичних положень про науково-технічних засобах, методах і прийомах експертно-криміналістичного дослідження деяких видів вибухових речовин і вибухових пристроїв (1975–1990). Це період розширення сфери застосування раніше відомих і активізації розробки нових методик криміналістичного дослідження у сфері криміналістичної вибухотехніки. Цей період почався в кінці 60-х – на початку 70-х рр., що зумовлено зростанням потреб слідчої практики у застосуванні спеціальних пізнань при розслідуванні. Почастішали факти розкрадання вибухових речовин, незаконного обороту вибухових речовин і виробів на їх основі, кримінальних вибухів, особливо терористичної спрямованості. У процесі виробництва експертиз у експертів-вибухотехніків стали виникати проблеми обґрунтування достовірності результатів дослідження. Потрібно було з'ясувати механізм утворення слідів вибуху, встановити закономірні зв'язки, пов'язані з їх вивченням, вирішити ідентифікаційні та інші питання. Тому на даному етапі найбільший пріоритет мали практичні розробки, спрямовані на вивчення окремих випадків застосування вибухових пристроїв у злочинних цілях та створення ряду спеціальних методик з виявлення, фіксації, збереження, вилучення і дослідженню вибухових речовин, вибухових пристроїв, засобів підривання і виявлення слідів їхнього застосування при розслідуванні, перш за все авіаційних подій, пов'язаних з вибухами. Третій етап – формування в системі теоретичних положень про відповідні об'єкти та вибухово-технічні засоби і методи їх виявлення, фіксації, вилучення і дослідження (1990–1995). Продовжують публікуватися статті та рекомендації з розробки науково-технічних засобів і методів розв'язання окремих завдань судової вибухотехнічної експертизи, стали з'являтися роботи, присвячені теоретичним проблемам вибухотехніки та вибухотехнічної експертизи. Вибух як спосіб вчинення злочинів став набувати дедалі більшого поширення, зростаючий технічний рівень розвитку населення сприяв виготовленню саморобних вибухових пристроїв, в країні різко збільшувалися масштаби нелегального обігу зброї, боєприпасів, вибухових речовин. Четвертий етап – 1995–2017 – етап формування нової криміналістичної теорії, що характеризується більш високим рівнем теоретичних досліджень, накопиченням довідкового і експериментального матеріалу. Цей матеріал вимагав узагальнення, систематизації та створення на цій основі рекомендацій, що дозволяють встановити

вид вибухового пристрою, який застосовувався, визначити групову приналежність вибухового пристрою за осколками, що залишилися після вибуху.

Криміналістичне вибухознавство – спеціальний розділ криміналістичного зброєзнавства, який вивчає закономірності конструювання вибухових пристроїв, їх технічні дані, закономірності вибуху і утворення їх слідів, а також практику розслідування злочинів, пов'язаних з вибухом [1]. Автор [2] визначає криміналістичну вибухотехніку як окреме криміналістичне вчення, що вивчає закономірності виникнення, перетворення і використовування криміналістичної інформації про вибухові речовини та вибухові пристрої, про предмети, які їх імітують, пов'язані з ними особи і об'єкти, про розроблені на цій основі науково-технічні засоби, прийоми і методики пошуку, обстеження, знешкодження, огляду, фіксації, вилучення і дослідження даних об'єктів і слідів їх застосування в цілях забезпечення карно-процесуальної, оперативно-розшукової, адміністративно-правової форм діяльності правоохоронних органів і спецслужб з попередження, виявлення і розкриття деяких видів злочинів.

Таким чином, протягом кількох останніх десятиліть відбувалося накопичення теоретичних матеріалів і практичного досвіду, готувалися відповідні фахівці, створювалися необхідні прилади, розроблялися методики дослідження. У результаті працями вчених-криміналістів і практиків у теорії криміналістики була сформована і систематизована нова галузь наукових знань, що відповідає сучасним вимогам правоохоронних органів у справі боротьби зі злочинністю. У наші дні вона отримує все більший розвиток.

На даний час проведення експертних експериментів під час виконання судових вибухово-технічних експертиз визначено положеннями п. 4.7 Наказу Міністерства внутрішніх справ України 09.07.2014 № 653 (Зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 28 липня 2014 р. за № 870/25647), що затвердив «Інструкцію про поводження з вибуховими матеріалами в органах і підрозділах внутрішніх справ України», а саме «у разі проведення експертних експериментів при дослідженні вибухових матеріалів залучаються спеціалісти-вибухотехніки, які мають право на проведення спеціальних вибухотехнічних робіт. Кількість спеціалістів-вибухотехніків визначає керівник (старший) підривних робіт, ураховуючи кількість питань, що поставлені на вирішення судової вибухотехнічної експертизи». Проведення експертних експериментів з метою визначення здатності об`єктів дослідження до вибуху повинні проводитись у спеціально пристосованих для цього місцях (вибухових камерах, вибухозахисних контейнерах закритого типу, підривних майданчиках або полігонах).

Таким чином, як транспортування вибухових матеріалів для проведення експертизи, так і проведення експертних експериментів для встановлення здатності об`єктів до вибуху вимагає значної кількості особового складу та використання спеціального обладнання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

При виконанні судових вибухово-технічних експертиз, де об`єктами дослідження є промислові вибухові пристрої або боєприпаси, до числа яких відносяться реактивні гранатомети, необхідно проводити експертні експерименти. Вони проводяться на полігонах (підривних майданчиках) із використанням спеціального вибухово-технічного обладнання. Дистанційний відстріл проводиться за умов повного та всебічного попереднього дослідження реактивного гранатомета та за відсутності ознак зовнішніх втручань у його конструкцію.

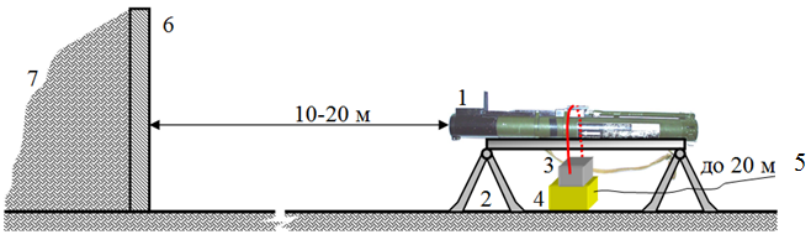



**Рис. 1. Схема відстрілу гранатомета: 1 – гранатомет; 2 – пускова станина; 3 – вантаж із ременем; 4 – висувна підставка; 5 – пусковий шнур; 6 – міцна перепона; 7 – земляний вал**

Під час проведення вибухотехнічних досліджень у постановах про проведення експертиз можливі питання про працездатність одноразових гранатометів з пострілами на здатність до роботи та вибуху. В таких випадках, за умов відсутності зовнішніх пошкоджень гранатомета, допускається дистанційний відстріл (знищення) гранатометного пострілу (рис. 1) [3].

Відомий пристрій для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів з пострілами [3], що містить станину 2 на якій закріплено реактивний гранатомет 1. Принцип дистанційного натиску на спускову скобу гранатомету 1 заснований на впливі сили тяжіння. Під станиною 2 розташовано вантаж на ремені 3 з скобою яка охвачує гранатомет 1 в зоні пускового елемента. Вантаж 3 розташовано на висувній підставці 4 до якої приєднано пусковий шнур 5. При витягуванні пускового шнура 5 з висувною підставкою 4 вантаж 3 падає з неї та скобою приводить в дію пусковий елемент – виконується відстріл реактивного гранатометного пострілу.

До вад відомого пристрою відноситься те, що при витягуванні пускового шнура 5 з висувною підставкою 4 може зрушуватися і вантаж 3, змінюючи положення відносно скоби в зоні пускового елемента, що може привести до відказу відстрілу або пострілу у не визначеному напрямку, який в свою чергу буде нести пряму загрозу життю і здоров`ю присутніх осіб.

**Актуальність дослідження**

Метою роботи є створення конструкції спеціального пристрою для забезпечення безпечного ефективного дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів з метою безпечного встановлення їх спроможності до пострілу, а саме: гранатометів «РПГ-18», «РПГ-22», «РПГ-26», «РПГ-27», «РПГ-28» та «РПГ-29» та досягнення мінімального ризику для життя вибухотехніків.

**Виклад основного матеріалу**

Для проведення експертних експериментів під час виконання судових вибухово-технічних експертиз було поставлено задачу створення Авторами розроблено спеціальний пристрій для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів [4] з метою встановлення їх спроможності до пострілу. Він містить станину виконану з двох зварних Х-подібних металевих рам з'єднаних стяжками, на одній з яких розташовано натискний важіль з пружним елементом та на іншій розташовано шків для направлення пускового шнура, а також штирі для кріплення пристрою до ґрунту. Конструктивні параметри важеля пристрою для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів з метою забезпечення ефективного спрацювання пускового елементу вибирають за умови:

$$L_1 / L_2 = 2{,}5 - 3, \tag{1}$$

де $L_1$ – довжина плеча важеля для натискання пускового елементу;

$L_2$ – довжина плеча важеля з пружним елементом.

Жорсткість пружної системи 8, з урахуванням зусилля на тертя у ролику, ваги плеча важеля $L_1$ та розтягування пускового шнура, вибирається в межах від 100 до 150 Н/мм.

Технічний результат полягає в отриманні безвідмовного спрацювання пускового елементу та безпечного здійснення дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів під час проведення експертних експериментів з метою встановлення їх спроможності до пострілу.

Конструкція пристрою для дистанційного наведення в дію реактивних гранатометів показана на рис. 2: вона складається з двох зварних Х-подібних металевих рам 1, з'єднаних стяжками 2, 3, 4, 5, 6. На верхній стяжці 5 встановлено важіль 7, з'єднаний пружним елементом 8 з нижньою стяжкою 6. На середній стяжці 3 встановлено шків 9 для направлення пускового шнура 10. Пристрій для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів закріплюється до ґрунту 11 за допомогою штирів 12. На рами 1 встановлюється реактивний гранатомет з пострілом 13 таким чином, щоб пусковий елемент 14 був зверху на рівні важеля 7.

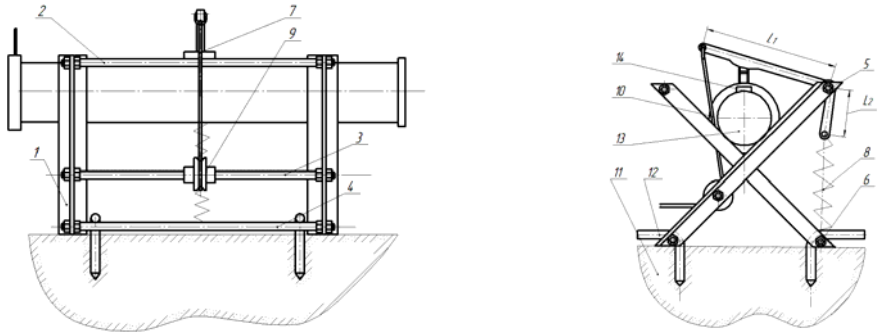



**Рис. 2. Схема конструкції пристрою для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів: 1 – рама; 2,3,4,5.6 – стяжки; 7 – важіль; 8 – пружний елемент; 9 – шків; 10 – пусковий шнур; 11 – ґрунт; 12 – штир; 13 – гранатомет з пострілом; 24 – пусковий елемент**

Працює пристрій наступним чином: реактивний гранатомет з пострілом 13 закріплюється до рами 1 за допомогою пластикових хомутів. Для запобігання неконтрольованого вибуху пусковий шнур 10 розмотується на безпечну відстань підриву пропускається через шків 9 та приєднується карабіном до важеля 7. Спеціалісти здійснюють відхід на безпечну відстань і розміщуються у відведеному для цього місці (окопі, бункері). Далі витягується пусковий шнур 10, що приводить в дію важіль 7, який натискає на пусковий елемент 14 і виконується відстріл.

**Рис. 3. Світлина пристрою для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів (головний вид)**

**Рис. 4. Світлина пристрою для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів (вид по осі пострілу)**

З метою перевірки працездатності запропонованого пристрою було виготовлено діючу конструкцію спеціального пристрою для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів на здатність до роботи та вибух, яку показано на рис. 3 та рис. 4 і були проведені польові експериментальні відстріли.

На рис. 5 показано світлину встановлення пристрою на підривному майданчику. На рис. 6 показано світлину моменту приведення в дію гранатомета до пострілу. На рис. 7 показано світлину моменту виконання пострілу.

**Рис. 5. Світлина встановлення пристрою на підривному майданчику**

**Рис. 6. Світлина моменту приведення в дію гранатомета до пострілу**

**Рис. 7. Світлина моменту виконання пострілу та розриву гранати**

## Висновки

У результаті перевірки встановлено, що експериментальні приведення в дію реактивних гранатометів відбувались безпечно із 100% ефективністю спрацювання.

Таким чином, спеціальний пристрій для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів дозволяє проводити безпечне та ефективне дистанційне приведення в дію реактивних гранатометів з метою безпечного встановлення їх спроможності до пострілу.

## Література

1. Плескачевский В.М. Оружие в криминалистике. Понятие и классификация / В.М. Плескачевский. – М. : ООО “НИПКЦ ВОСХОД”, 1999. – 384 с.

2. Моторный И.Д. Криминалистическая взрывотехника: новое учение в криминалистике : учебно-методическое и справочное пособие / И.Д. Моторный. – М. : Изд-во И.И. Шумилова, 2000. – 177 с.

3. Пащенко В.І. Способи знищення боєприпасів методом підриву (СДВ 15.80) (згармонізовано у відповідності до стандарту ООН IMAS 11.20). Інструкція / В.І. Пащенко, Р.Л. Хомко. – Київ, 2007. – 47 с.

4. Патент на корисну модель № 134057 України, МПК F42B3/02. Пристрій для дистанційного приведення в дію реактивних гранатометів / Кудінов О.О., Марчук О.П., Зарічний А.В., Ганзюк А.Л., Кравчук О.В., Гордєєв А.І. (Україна). – u 2018 12411 ; заяв. 13.12.2018. Опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8. – 4 с.

### References

1. Pleskachevsky V.M. Weapon in forensic science. Concept and classification. M.: LLC "NIPKTS VOSKOD", 1999. 384 p.

2. Motorniy I.D. Forensic explosive engineering: a new doctrine in forensic science: A methodical and reference manual. M.: Publishing II Shumilova, 2000. 177 p.

3. Paschenko V.I., Khomko R.L. Methods of destruction of ammunition by the method of subversion (SDV 15.80) (Harmonized in accordance with the UN standard IMAS 11.20) Instruction. Kyiv. 2007. 47 p.

4. Patent for Utility Model No. 134057 of Ukraine, IPC F42B3 / 02. Device for remote reactive rocket launchers / Kudinov O.O., Marchuk O.P., Zarichny A.V., Hansyuk A.L., Kravchuk O.V., Hordeev A.I. (Ukraine); u 2018 12411; Application 12/13/2018 Published by Apr 25, 2011, Byul. No. 8. 4 p.

Рецензія/Peer review : 14.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-35-38
УДК 621.893;621.77;621.78

О.О. СЛАЩУК, В.О. СЛАЩУК
Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

# ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ, ОБУМОВЛЕНІ ХВИЛЬОВИМИ ПРОЦЕСАМИ ПРИ ТЕРТІ

*В статті розглянуто процеси, що відбуваються при роботі трибологічної системи без розвантаження контактної пари в режимі реального часу. Показано, що руйнування матеріалу при терті накопичені не в локальних точках на поверхні в зонах контактної взаємодії, а спостерігаються на досить великій глибині. Досліджено вплив на тибологічний вузол хвильових процесів зношування, які пов'язані з утворенням звукових хвиль. Запропоновано метод, що розширює можливість дослідження трибологічних систем для визначення характеристик руйнування поверхонь.*

*Ключові слова: трибологія, зношування, акустична емісія, руйнування, тертя.*

O.O. SLASHCHUK, V.O. SLASHCHUK
Khmelnytsky scientific research forensic centre of the ministry of internal affairs of Ukraine

## FEATURES OF DESTRUCTION CONTACT SURFACES CREATED BY WAVE PROCESSES BY FRICTION

*This article presented process occurring at work of tribological system without unloading of contact pairs in real time. Purpose of the work is to study the process of surface destruction at low normal loads, describe dynamics of destruction process without interfering with work of loaded node. Prove nonlocal nature of contact interaction in process of friction and take into account existing feedback in system. Analyze phenomenon in which in process of contact interaction there are vibration fields that bind together all the components of system, changing nature of contact reactions from kinematics to dynamic ones. It is shown that destruction of material at friction is not accumulated in local points on surface in contact interaction zones, but observed at a fairly large depth. The influence on the tribological node of wave processes of wear, which are connected with the formation of sound waves, what is investigated. Method is proposed that expands the possibility of studying tribological systems for determining the characteristics of surface destruction. From the analysis of well-known research results, one can draw the following conclusion, that at maxima of coefficient of friction tribological connection of the shaft-sleeve works on the edge of jamming. This is wave process that has no explanation within the framework of tribokinematics. The presence of not rigid (belting) create an illusion of wear. In fact, they result in occurrence of low frequency infrasonic waves that affect wear. The method of acoustic emission can supplement traditional methods of determining characteristics of surface damage, as it gives an opportunity to observe as a global destruction of contact surfaces at a high infrasonic cluster, and local surface fracture with an increase in the high-frequency (ultrasonic) cluster.*

*Keywords: tribology, wear, acoustic emission, destruction, friction.*

## Вступ

Процес тертя завжди складається з багатьох етапів. На початку відбувається взаємодія спряжених поверхонь на межі шорсткості, що в процесі еволюції призводить до руйнування поверхневих і глибинних шарів матеріалу [1].

Вважається, що напруження локалізуються в плямах контакту. Навіть, коли матеріал не досягає межі текучості, багаторазове повторюване навантаження може призвести до накопичення напружень в глибинних шарах матеріалу і призвести до утворення тріщин, сколів, відривів частинок (утворення третього тіла) [2].

## Мета і постановка задачі

Метою роботи є дослідження процесу руйнування поверхонь при низьких нормальних навантаженнях, опис динаміки процесу руйнування без втручання в роботу навантаженого вузла. Довести нелокальний характер контактної взаємодії в процесі тертя та врахувати діючі зворотні зв'язки в системі [3]. Проаналізувати явище, при якому в процесі контактної взаємодії виникають вібраційні поля, які зв'язують воєдино всі складові системи, змінюючи характер контактних реакцій з кінематичних на динамічні.

## Аналіз відомих результатів

Актуальність дослідження даної тематики підтверджується значним доробком наукових праць, представлених в спеціалізованих наукових виданнях: фізична мезомеханіка, листи в журнал технічної фізики [4, 5].

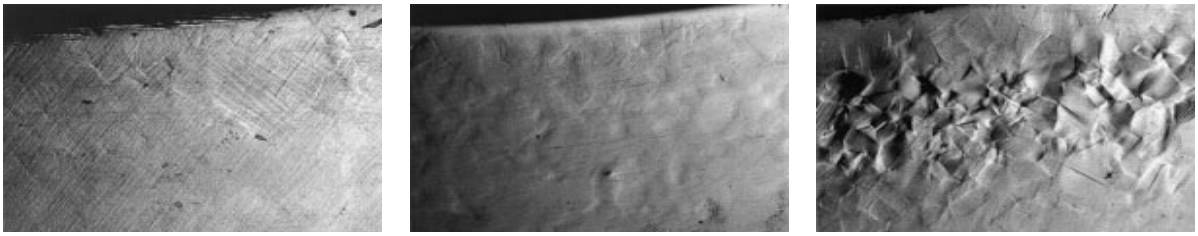
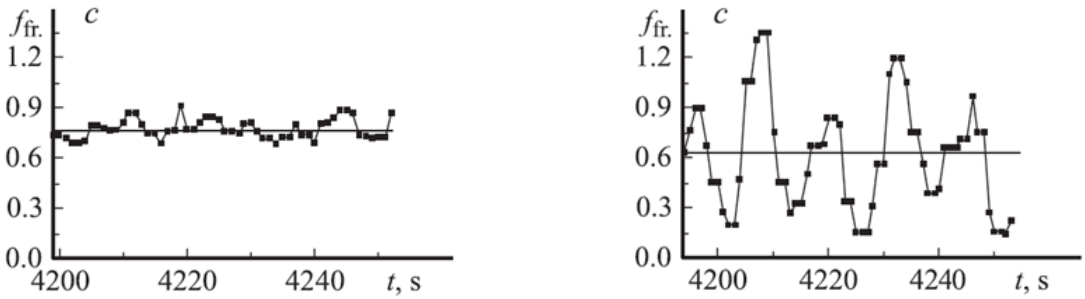


**Рис. 1. Глибинне руйнування матеріалу внаслідок роботи трибовузла**

Як видно з рис. 1, руйнування, накопичені не в локальних точках на поверхні, а спостерігаються на досить великій глибині, що досягає 2-3 мм. Пояснюються такі утворення деформацій з позиції збудження

пружних хвиль. Їх механізм пов'язаний з режимами схоплення в плямах дотику, який призводить до генерації звуку [4].

На рис. 2 представлені значення коефіцієнта тертя при дослідженні навантаженого вузла в процесі роботи трибосистеми [5].




а б

**Рис. 2. Коефіцієнти тертя: а – при дослідах простий; б – із застосуванням приладу, що гасить звукові коливання (демпфер)**

Як видно з графіка, гасіння звукових коливання не завжди призводить до покращення режимів роботи контактних поверхонь. Регулярне квазіперіодичне підвищення коефіцієнту тертя до значень 0,9-1,35, з нашої точки зору, пояснюється ультразвуковими коливаннями всієї установки, пов'язаними у тому числі з низькою жорсткістю привода – ремінною передачею від електричного двигуна та вал установки (рис 3).

**Рис. 3. Зовнішній вигляд ремінної передачі установки УМТ 2168**

**Проведення дослідів**

Відповідно до матеріалів, представлених вище, дослідження проводилися на установці УМТ 2168 в режимі сухого тертя за схемою вал-втулка при низькому діапазоні тиску від 1 до 4 МПа.

Спеціалізована установка тертя 2168 УМТ (рис. 4), призначена для випробувань фрикційних, антифрикційних і змащувальних матеріалів на тертя та зношування в широкому діапазоні режимів.

*Технічні дані*:

Привід машини – електричний, оснащений плавним регулятором швидкості. Вимірювач моменту тертя – електромеханічний. Притискання зразків здійснюється пневматично, визначення притискної сили здійснюється за рахунок встановленого манометра. Охолодження системи – водяне (від водопроводу).

*Принцип роботи:*

В процесі випробування визначаються момент тертя, сила, яка здійснює притискання, частота обертання, шлях тертя та температура.

**Загальний вигляд спеціалізованої установки тертя 2168 УМТ**

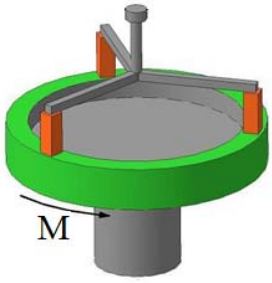



**Схема тертя зразка і контртіла, за якою проводилися дослідження**

**Рис. 4. Спеціалізована установка тертя 2168 УМТ та схема навантаження вузла трибосистеми**

У трибологічному дослідженні за схемою «палець – диск» контртіло виготовлено зі Сталь 45, а досліджувані зразки – зі Сталь 30ХГСА, Алюміній АД1.

Паралельно трибологічному дослідженню проводився запис звуку мікрофоном Media-tech SFX microphone MT 383. Обробка даних здійснювалась програмою Audacity 2.0.5 (рис. 5).

Аналізуючи спектрограму холостого ходу установки можна стверджувати про кластерний характер, на ньому чітко видно і низькочастотну (інфразвук) і високочастотну (ультразвук) складові. Результати проведеного дослідження представлені на рис. 6–8.

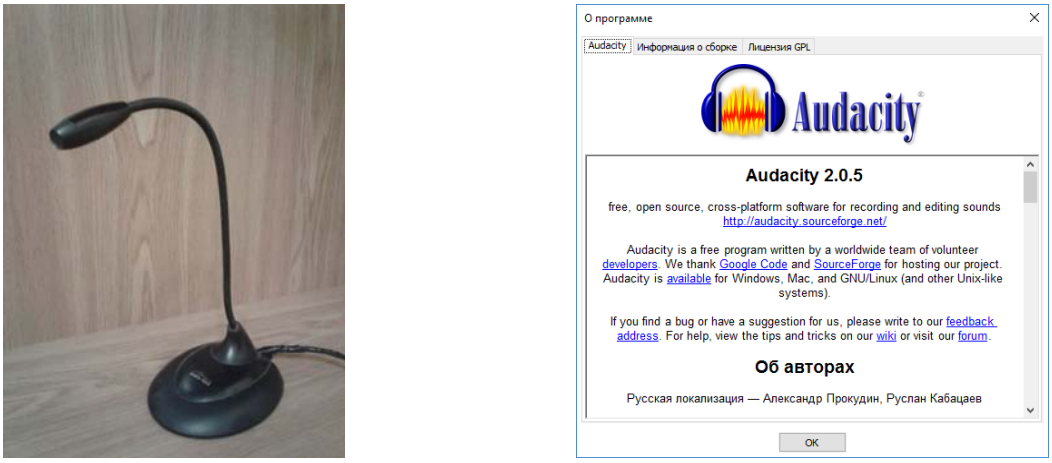



**Рис. 5. Зовнішній вигляд звукознімача та програма запису та обробки звукових даних**

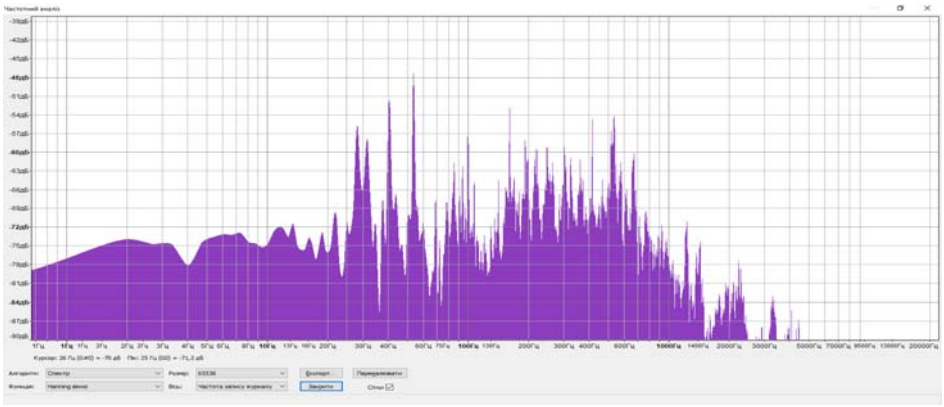


**Рис. 6. Спектрограма роботи спеціалізованої установки тертя 2168 УМТ без навантаження**

При дослідженні Сталі 30ХГСА спостерігається збільшення низькочастотного і високочастотного кластеру, які відсутні при холостому режимі (рис. 7). Такі ж результати спостерігаються при дослідженні Алюмінію АД1 (рис. 8).

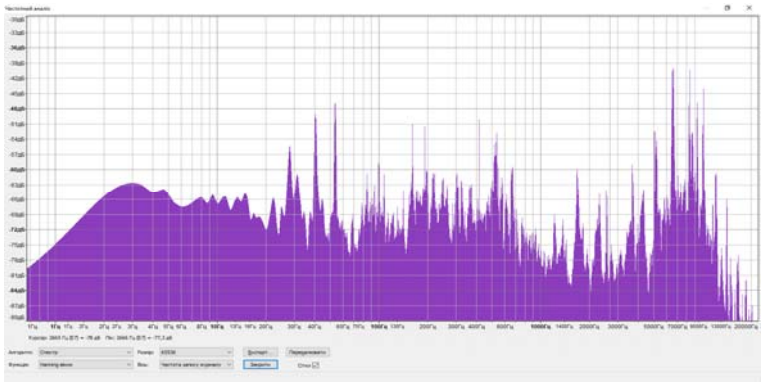


**Рис. 7. Спектрограма дослідження зразка зі Сталь 30ХГСА**

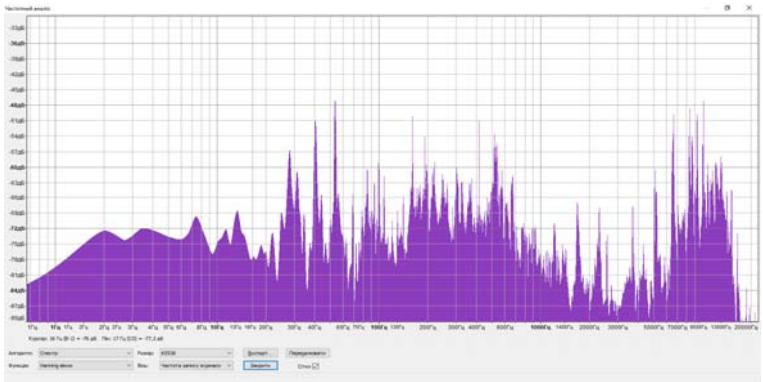


**Рис. 8. Спектрограма дослідження зразка з Алюміній АД1**

**Висновки**

З аналізу відомих результатів досліджень можна зробити висновок, що в максимумах коефіцієнта тертя трибологічне з'єднання вал-втулка працює на межі заїдання. Це хвильовий процес, який не має пояснення в рамках трибокінематики.

Наявність не жорстких (ремінних) передач створює ілюзію зношування. Насправді вони призводять до виникнення інфразвукових хвиль з низькими частотами, які впливають на зношування.

Метод акустичної емісії може доповнити традиційні способи визначення характеристики руйнування поверхонь, адже дає можливість спостерігати як глобальне руйнування контактних поверхонь при високому інфразвуковому кластері, так і локальні поверхневі руйнування при збільшенні високочастотного (ультразвукового) кластеру.

**Література**

1. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах : навчальний посібник. – Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 114 с.

2. Денисенко М.І. Термодинамічні процеси тертя та зношування конструкційних матеріалів // Техніка та енергетика : науковий журнал. 2015. № 196, лют. С. 64. ISSN 2663-1342.

3. Скріпченко Н.Б., Ткачук М.М., Неділько К.Д., Киричук Д.В., Борисенко С.В., Касай О.І. Контактна взаємодія складнопрофільних деталей з урахуванням локальної податливості поверхневого шару // Вісник НТУ "ХПІ". 2016. № 39(1211). С. 93. ISSN 2079-0775.

4. Колубаєв А.В., Іванов Ю.Ф., Сізова О.В., Колубаєв Є.А., Алйошина Є.А., Громов В.Є. Вплив пружних збуджень на формування структури поверхневого шару сталі Гадфільда при терті // Журнал технічної фізики. 2008. Том 78, вип. 2. С. 68.

5. Колубаєв Є.А., Колубаєв А.В., Сінзова О.В., Рубцов В.Є., Вагін І.Н., Попов В.Л. Особливості динаміки тертя Сталі Гадфільда // Фізична мезомеханіка. 2008. С. 55.

**References**

1. Zakalov O.V., Zakalov I.O. Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh : navchalnyi posibnyk. – Ternopil : Vydavnytstvo TNTU im. I. Puliuia, 2011. 114 s.

2. Denysenko M.I. Termodynamichni protsesy tertia ta znoshuvannia konstruktsiinykh materialiv // Tekhnika ta enerhetyka : naukovyi zhurnal. 2015. № 196, liut. S. 64. ISSN 2663-1342.

3. Skripchenko N.B., Tkachuk M.M., Nedilko K.D., Kyrychuk D.V., Borysenko S.V., Kasai O.I. Kontaktna vzaiemodiia skladnoprofilnykh detalei z urakhuvanniam lokalnoi podatlyvosti poverkhnevoho sharu // Visnyk NTU "KhPI". 2016. № 39(1211). S. 93. ISSN 2079-0775.

4. Kolubaiev A.V., Ivanov Yu.F., Sizova O.V., Kolubaiev Ye.A., Alioshyna Ye.A., Hromov V.Ie. Vplyv pruzhnykh zbudzhen na formuvannia struktury poverkhnevoho sharu stali Hadfilda pry terti // Zhurnal tekhnichnoi fizyky. 2008. Tom 78, vyp. 2. S. 68.

5. Kolubaiev Ye.A., Kolubaiev A.V., Sinzova O.V., Rubtsov V.Ie., Vahin I.N., Popov V.L. Osoblyvosti dynamiky tertia Stali Hadfilda // Fizychna mezomekhanika. 2008. S. 55.

Рецензія/Peer review : 21.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

**ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-39-43
УДК 677.047.622.112.2

М.О. КУЩЕВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

# ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГОЛОВНИХ УБОРІВ ПНЕВМОРІДИННИМ СПОСОБОМ

*Автором запропоновано пневморідинний спосіб формування складних просторових форм-головок головних уборів. Наведено фізичну модель запропонованого способу, що дає можливість математично описати процес формування.*

*Ключові слова: формування, текстильний матеріал, двофазний потік.*

M. KUSCHEVSKIY
Khmelnytskyi National University

**PHYSICAL MODEL OF FORMING PROCESS OF DETAILS OF HEAD-DRESSES BY PNEUMO-LIQUID BY METHOD**

*The research of article is a study of possibility of the use of kinetic energy of falling air-aquatic in future diphasic stream on forming ability of textile materials. A purpose of work is a calculation of physical model of the real process of forming of heads of head-dresses as a result of action of diphasic stream. Thus it should be noted that kinetic energy of falling diphasic stream can correct due to adjusting of one of constituents of compressed air. A scientific novelty of the got result is in the presented physical model of process of forming of textile material due to the static loading. The got model enables in more depth to study processes which take a place at deformation of separate types of sewing wares, calculate the optimum parameters of process for fabrics with different structural characteristics.*

*Keywords: forming, textile material, diphasic stream.*

## Вступ

В останні роки швейна промисловість стала все більше перетворюватись у високоефективну галузь. Кожен рік на підприємствах впроваджується більш як сто тисяч одиниць нового обладнання, що сприяє збільшенню механізації виробництва. Завдяки науково-технічному прогресу швидкими темпами розвивається і покращується не лише становище на швейних підприємствах, але й прогресує розвиток моди в непередбачених і розгалужених напрямках.

Перспектива роботи галузі полягає у збільшенні частки вітчизняних товарів на внутрішньому ринку та у зростанні експорту продукції власного виробництва. Це можливо завдяки впровадженню сучасного обладнання, ліцензійних та малоопераційних технологій, використанню комп'ютерних технологій на всіх етапах виготовлення швейних виробів, набуттю досвіду роботи на основі співпраці з закордонними фірмами-замовниками.

Актуальність теми – забезпечення належної якості та конкурентоздатності швейних виробів потребує впровадження інноваційних технологій та нових наукових розробок на всіх стадіях швейного виробництва.

В останні роки значна увага приділяється розробці нових енергозберігаючих технологій та обладнання для волого-теплового оброблення виробів, зокрема для формування деталей головних уборів.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом в якості робочого середовища на операціях формування запропоновано нове робоче середовище – вода. Використання води дає змогу формувати матеріали без використання температури [1–5] та дозволяє зменшити тиск на тканину, що сприяє скороченню енерговитрат та покращенню зовнішнього вигляду виробів (не утворюється полисків, опалів тканини). Крім того, вода дозволяє переносити в "трубу" структуру тканини частинки клею у колоїдному стані [3, 6]. На перспективу використання робочого середовища вказує значне зростання деформаційних властивостей текстильних матеріалів, що наштовхує авторів [3, 6] на думку, що таке середовище виконує роль "мастила", чим покращує рухомість як "тонкої", так і "грубої" структури матеріалу за рахунок зменшення коефіцієнту тертя в системі ниток [7] . Крім того, пропонується використовувати воду в якості силового поля, тому що вона може набувати різних коливальних рухів, і тим самим створювати вібрацію як одноплощину [1 , 3, 9], так і просторову [5, 10], а також відцентрові сили [8], що передаються на тканину, тобто активізувати «грубу» структуру матеріалу. Тому доцільно продовжувати пошук нових альтернативних способів формування деталей на основі використання РАРС.

Розробка способу формування деталей швейних виробів наштовхується на значні труднощі, що пояснюються складністю та багатогранністю процесів формотворення виробів з текстильних матеріалів. У зв`язку з цим при розробці способу формування велике значення набуває експериментальний шлях дослідження. Подібні дослідження необхідно проводити комплексно, шляхом вибору оптимальної послідовно-паралельної структури процесу збору та обробки інформації.

**Формулювання мети статті**

Метою роботи є розробка фізичної моделі процесу деформації тканин при використанні кінетичної енергії падаючого потоку води на елемент, що формується. Отримана модель дасть змогу більш глибоко вивчити процеси, що відбуваються при деформаціях текстильних матеріалів та теоретично визначити оптимальні умови деформації тканин з різним сировинним складом та структурою.

**Виклад основного матеріалу досліджень**

Сутність способу полягає у використанні двофазних потоків. Двофазні потоки виконують роль нового робочого середовища, які одночасно поєднують функцію силового поля (механічна дія) та функцію пластифікатора (вода). При цьому забезпечується розподіл формувального зусилля по всьому об'єму тканини, але найбільше навантаження припадає на нижні частини зразка, що формується. Процес формування здійснюється шляхом змінного по величині силового поля повітря – водяної суміші.

Робоча схема динамічних властивостей повітряно-водяної суміші наведена на рис. 1

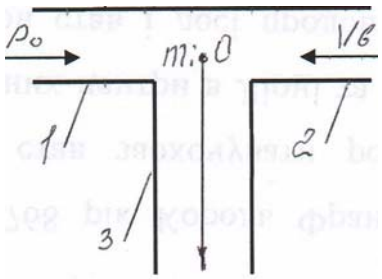



**Рис. 1. Розрахункова схема властивостей повітряно-рідинної суміші**

По трубці 1 в форсунку 3 поступає повітря під тиском $P_o$ , по трубці 2 – вода, швидкість якої в трубці рівна $V_B$. В форсунці 3 тиск повітря та вода змішуються, утворюючи свого роду суспензію – суміш краплин масою $m_i$ і повітря.

Потік рідини в трубці 2 турбулентний. Розбивання рідини на окремі краплинки відбувається в області точки *O* (початок системи координат).

Нехай в об'ємі форсунки утворюються краплини масою $m_i$ (рис. 2.), які утворюють суміш та характеризуються функцією розподілу *f (m)*. Тоді під *m* слід розуміти середнє значення нормованої функції розподілу:

$$m_o = \int_0^{\infty} f(m)dm, \qquad (1)$$

m – маса рідини;

d – диференціал;

f – функція розподілу.

Зрозуміло, що потік повітря та водяний потік мають компенсувати горизонтальні складові імпульсів та краплини, мають можливість рухатися лише у вертикальному напрямку (вздовж осі Ox). Без втрати загальності можна рахувати, що внутрішні поверхні трубок не змочувальні.

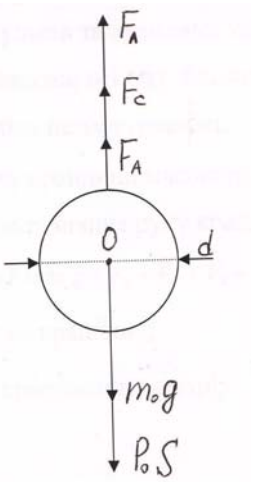



**Рис. 2. Розподіл сил, які діють на краплину в польоті**

Розглянемо динаміку краплини масою $m_o$ в форсунці 3. Запишемо динамічне рівняння руху краплини:

$$m_0 \ddot{\vec{r}} = m_0 \vec{g} + \vec{F}_p + \vec{F}_C + \vec{F}_A + \vec{F}_л, \qquad (2)$$

де $\vec{F}_p$ – сила тиску повітря на краплину;

$\vec{F}_л$ – робочий опір руху краплини в повітрі;

$\vec{F}_C$ – сила Стокса;

$\vec{F}_A$ – сила Архімеда.

$$F_A = m_0 g \frac{\rho_n}{\rho_в}; \tag{3}$$

$$F_C = 6\pi\eta r V = 3\eta \cdot \sqrt[3]{\frac{6\pi^2 m_0}{\rho_n}} \cdot \frac{dx}{dt}; \tag{4}$$

$$F_Л = \frac{\rho_n \cdot V^2 \cdot S}{2} = \frac{1}{\rho_n}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \cdot S; \tag{5}$$

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho_n (U - V)^2 \cdot S = \frac{1}{2} \cdot \rho_n \left(U - \frac{dx}{dt}\right)^2. \tag{6}$$

Проектуємо рівняння (2) по осі Ох:

$$m_0 \ddot{x} = m_0 g + \frac{\pi d^2}{8} \cdot \rho_n \cdot (U - \dot{x})^2 - \frac{\pi d^2}{8} \cdot \rho_n \cdot \ddot{x} - 3\eta \cdot \sqrt[3]{\frac{6\pi^2 m_0}{\rho_n} \cdot x - \frac{\rho_n}{\rho}} \cdot m_0 g, \tag{7}$$

де $\ddot{x}$ – прискорення; $\dot{x}$ – швидкість.

Зведемо рівняння (7) до більш компактного виду:

$$\ddot{x} = -a_1; \dot{x} + a_0 \tag{8}$$

$$a_1 = \frac{2U}{d} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} + \frac{3\eta}{4\rho d^2};\ a_0 = \left(1 - \frac{\rho n}{\rho}\right) \cdot g + \frac{3}{32} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} \cdot U^2 \tag{9}$$

де $U$ – швидкість повітря в форсунці 3;

$\rho_n$, $\rho$ – густина повітря та води;

$d$ – діаметр краплини;

$\eta$ – динамічна в'язкість повітря.

Початкові умови для диференціального рівняння (8) вибираємо наступні:

$$x(0) = 0;\ \dot{x}(0) = 0 \tag{10}$$

Для знаходження характеру руху краплини розв'язуємо рівняння (8) з початковими умовами (7):

Заміна:

$$\dot{x}(t) = V;\ \ddot{x} = \dot{V}(t) \tag{11}$$

Отримаємо рівняння для швидкості краплини:

$$\dot{V} + a_1 V = a_0 \tag{12}$$

Розв'язок з урахуванням початкових умов:

$$V(t) = \frac{a_0}{a_1} \cdot \left(1 - e^{-a_1 t}\right) \tag{13}$$

$$x(t) = \frac{a_0}{a_1} \cdot t - \frac{a_0}{a_1} \cdot \left(1 - e^{-a_1 t}\right) \tag{14}$$

Приймаємо наближення:

$$a_1 \approx \frac{2U}{d} \cdot \frac{\rho_n}{\rho};\quad U_0 \approx \frac{3}{32} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} \cdot U^2 \tag{15}$$

Отримаємо залежність швидкості краплини від висоти її польоту *V(H):*

$$V(H) \approx \frac{2H}{d} \cdot U \tag{16}$$

Розраховано швидкість удару краплини.

В роботі наведені результати досліджень силового поля, яке викликає деформацію в тканині. Технічна реалізація силового поля наступна: з вертикального сопла поступає повітряно-водяна суміш під тиском *P*, яка достатня для того, щоб проштовхнути крізь зразок, що формується суміш $H>R$ ($R$ – найвища точка формуючого елемента). Без втрати загальності можна вважати, що формуючий елемент симетричний

відносно площини *ZOY*. Вибираємо форму у вигляді півсфери ($x^2 + y^2 + Z^2 = R^2$; $Z > 0$). Сила $F_T = F\sin\varphi$ є силою, яка притискує тканину до форми (без деформації). Сила $F_o$ розтягує тканину; $F_o = F\sin\varphi$. Якщо врахувати, що на формуючий елемент *dydz* діє сила $dF = SV^2 / dydz$, то

$$F_o = dF\cos\varphi = SV^2 / 2dydz\cos\varphi \quad (17)$$

Водяні краплини, які змішуються в форсунці, отримують певну швидкість *V* (перед зіткненням з нитками тканини). Ці краплини при ударі на текстильний матеріал, що формується, виконують дві функції:

- діють з певною силою *F* на нитку;
- проникають в простір між нитками.

Залежно від кута падіння на поверхню, сила *F* може бути розкладена на дві складові: перпендикулярна до поверхні (притискаюча сила $F_1$) і дотична (сила розтягу $F_2$). Розподіл деформації по контуру формуючого елемента представлений на рис. 3. Частина повітряно-водяної суміші, попадаючи між нитки, зменшує коефіцієнт тертя між системами ниток і величини сили $F_2$ виявляється достатньою для зсуву нитки. Величина цього зсуву залежить від пружних властивостей ниток. Нова довжина нитки стає більшою, тому що проявляється рельєфність тканини.

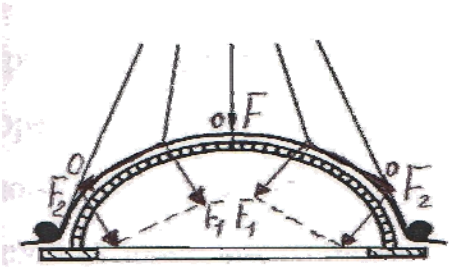



**Рис. 3. Схема розподілу деформації по контуру формуючого елемента**

Подальше продавлювання повітряно-водяної суміші з тканини призводить до збільшення коефіцієнта тертя. Після цього нитки тканини залишаються в деформованому стані. Рельєф зникає з часом. Такий механізм підтверджений експериментально. Даний вплив сил не є руйнівним і не змінює фізико-механічні та хімічні властивості тканини. Експериментально отримані проби зберігають форму тривалий час (2 місяці). Найбільшою деформуючою буде сила в нижніх частинах форми. Проблемним є питання анізотропії тканини, яка може проявлятися в неякісній невідомій деформації.

**Висновок**

Розроблено фізичну модель процесу деформації тканин при пневморідинному способі формування. Отримана модель дає змогу більш глибоко вивчити процеси, що відбуваються при деформаціях текстильних матеріалів та теоретично вирахувати оптимальні умови деформації тканин з різним сировинним складом та структурою.

**Література**

1. Буханцова Л.В. Удосконалення процесу формування жіночих головних уборів : дис. … канд. тих. наук : 05.19.04 / Буханцова Л.В. – Х., 2007. – 228 с.

2. Войтюк М. В. Удосконалення технології формування об'ємних деталей головних уборів на основі гідровакуумних способів : дис. … канд. техн. наук : 05.18.19 / Войтюк М. В. – Хмельницький, 2014. – 255 с.

3. Кошевко Ю. В. Удосконалення процесу формування та закріплення форми деталей жіночих головних уборів із тканих матеріалів : дис. … канд. техн. наук : 05.19.04 / Кошевко Ю. В. – Хмельницький, 2010. – 170 с.

4. Якимчук О.В. Розробка технології формування деталей головних уборів гідроструменевим способом : дис. … канд. техн. наук : 05.19.04 / Якимчук О.В. – Хмельницький, 2010. – 168 с.

5. Химіч Г.М. Розробка технології просторового формування головних уборів в рідкому середовищі : дис. канд. техн. наук : 05.18.19 / Химіч Г.М. – Хмельницький, 2016. – 215 с.

6. Julia Koshevko, Nikolay Kushevskiy. Disign of energy-saving technology of shaping and fixing the shape of headdresses parts. Technology organic and inorganic substances. Eastem European Jornal of Enterprise Tehnologies. Vol 3. N. 6(81), 2016, p. 16–26. URL: www.scopus.com/authid/detail.uri?authorld=57192819394

7. Kuschevskiy N. Prereguisites for the development of nydro-jet technology in designing women's headgear at hospitality establishments / N. Kuschevskiy, O. Yakymchuk, D. Yakymchuc, J. Koshevko, E. Chepelyik, N. Myrhorodska, O. Dzyundzya, V. Burak // Fastern-Europen Journal of Enterprise Technologies Enginering technological system. – 2018. – Vol. 1. No 1 (91). – P. 36–46.

8. Кущевський М.О. Теоретичні основи гідровідцентрового способу формування текстильних матеріалів / М.О. Кущевський, Ю.В. Кошевко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015.

– № 2. – С. 91–96.

9. Патент 98747 UA, МПК A41H 41/00 B29C 53/00. Установка для віброформування об'ємних деталей головних уборів у горизонтальній площині / Химич Г. М., Кущевський М. О. – № u2014 11130 ; заявл. 13.10.2014 ; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9.

10. Патент 97148 UA, МПК D06B 17/00. Спосіб формування об'ємних деталей головних уборів за допомогою просторової вібрації / Химич Г. М., Кущевський М. О. – № a2014 10806 ; заявл. 03.10.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

**References**

1. Bukhantsova L.V. Udoskonalennia protsesu formuvannia zhinochykh holovnykh uboriv : dys. … kand. tykh. nauk : 05.19.04 / Bukhantsova L.V. – Kh., 2007. – 228 s.

2. Voitiuk M. V. Udoskonalennia tekhnolohii formuvannia obiemnykh detalei holovnykh uboriv na osnovi hidrovakuumnykh sposobiv : dys. … kand. tekhn. nauk : 05.18.19 / Voitiuk M. V. – Khmelnytskyi, 2014. – 255 s.

3. Koshevko Yu. V. Udoskonalennia protsesu formuvannia ta zakriplennia formy detalei zhinochykh holovnykh uboriv iz tkanykh materialiv : dys. … kand. tekhn. nauk : 05.19.04 / Koshevko Yu. V. – Khmelnytskyi, 2010. – 170 s.

4. Yakymchuk O.V. Rozrobka tekhnolohii formuvannia detalei holovnykh uboriv hidrostrumenevym sposobom : dys. … kand. tekhn. nauk : 05.19.04 / Yakymchuk O.V. – Khmelnytskyi, 2010. – 168 s.

5. Khymich H.M. Rozrobka tekhnolohii prostorovoho formuvannia holovnykh uboriv v ridkomu seredovyshchi : dys. kand. tekhn. nauk : 05.18.19 / Khymich H.M. – Khmelnytskyi, 2016. – 215 s.

6. Julia Koshevko, Nikolay Kushevskiy. Disign of energy-saving technology of shaping and fixing the shape of headdresses parts. Technology organic and inorganic substances. Eastem European Jornal of Enterprise Tehnologies. Vol 3. N. 6(81), 2016, r. 16–26. URL: www.scopus.com/authid/detail.uri?authorld=57192819394

7. Kuschevskiy N. Prereguisites for the development of nydro-jet technology in designing womens headgear at hospitality establishments / N. Kuschevskiy, O. Yakymchuk, D. Yakymchuc, J. Koshevko, E. Chepelyik, N. Myrhorodska, O. Dzyundzya, V. Burak // Fastern-Europen Journal of Enterprise Technologies Enginering technological system. – 2018. – Vol. 1. No 1 (91). – P. 36–46.

8. Kushchevskyi M.O. Teoretychni osnovy hidrovidtsentrovoho sposobu formuvannia tekstylnykh materialiv / M.O. Kushchevskyi, Yu.V. Koshevko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2015. – № 2. – S. 91–96.

9. Patent 98747 UA, MPK A41N 41/00 V29S 53/00. Ustanovka dlia vibroformuvannia obiemnykh detalei holovnykh uboriv u horyzontalnii ploshchyni / Khymych H. M., Kushchevskyi M. O. – № u2014 11130 ; zaiavl. 13.10.2014 ; opubl. 12.05.2015, Biul. № 9.

10. Patent 97148 UA, MPK D06B 17/00. Sposib formuvannia obiemnykh detalei holovnykh uboriv za dopomohoiu prostorovoi vibratsii / Khymych H. M., Kushchevskyi M. O. – № a2014 10806 ; zaiavl. 03.10.2014 ; opubl. 10.03.2015, Biul. № 5.

Рецензія/Peer review : 17.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-44-50
УДК 677.075: [687.016: 687.13]

М.С. ОНИСЬКО, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
Київський національний університет технологій та дизайну

# РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЖІНОЧИХ ТРУСІВ ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОЇ ДІЇ

*Робота присвячена розробці асортименту багатофункціональної білизни лікувально-профілактичного призначення для жінок різних вікових груп. Запропонований білизняний виріб рекомендується для зниження больових відчуттів під час критичних днів. Для виготовлення жіночих трикотажних трусів запропоновано структуру комбінованого переплетення, сформовану рядами переплетення інтерлок та трубчаста гладь. У якості сировини використано бавовняну пряжу та комплексну текстуровану поліамідну нитку з еластановим сердечником. Для зняття больового синдрому запропоновано до конструкції трусів в області поперекового та крижового відділу ввести аплікатор, що забезпечуватиме масажну дію та сприятиме розв'язанню проблеми періодичного болю у жінок.*

***Ключові слова:*** *комбіноване переплетення, багатофункціональна жіноча білизна, білизна лікувально-профілактичного призначення, елемент масажної дії, аплікатор.*

M.S. ONYSKO, L.IE. HALAVSKA
Kyiv National University of Technology and Design

## DEVELOPING THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING WOMEN'S UNDERPANTS HAVING A THERAPEUTIC AND PROPHYLACTIC EFFECT

*The work considers the development of a range of therapeutic and prophylactic multifunctional underwear for women of different age groups. Modern approaches to the creation of multifunctional therapeutic and prophylactic underwear have been analysed in this work. The use of products with a massage effect is recognized as one of the effective ways of relieving pain and fatigue, and getting a charge of energy. The proposed underwear product is recommended for reducing painful sensations associated with periods. To make the knitwear women's underpants, the structure of combined weaving formed by rows of interlock knitting and tubular satin stitch, is proposed. Cotton yarn and complex textured polyamide threads with elastane core were used as the raw material. To alleviate the pain syndrome, we propose to add an applicator to the design of the underpants in the lumbar and sacral regions, which will provide a massage effect and contribute to solving the problem of periodic pain in women. In order to develop the design of the applicator, providing acupressure, the biologically active zone responsible for the localization of pain was analysed. The projection location of this biologically active zone on the woman's body coincides with the quadrilateral of Michaelis which is a rhombus-shaped contour that is sometimes visible on the lower human back. Focusing on the average size of the, quadrilateral of Michaelis we have developed a pentagonal shape applicator design. Acupressure massage effect of the applicator in the daily use of the product is proposed to carry out by mechanical action of the lumpy protrusions on its surface. Externally, the applicator looks like hemispheres, which are interconnected by a thin flat thread and create a relief surface. According to the results of the study, the effectiveness of massage action and the convenience of using the therapeutic and prophylactic product is ensured by the successful choice of knitted fabrics for the underwear, the design of the product with scientifically based characteristics, the location, size, and design (of the applicator) of the massaging element, which provides beneficial effect on the health and emotional well-being of women.*

*Key words: combined weaving, multifunctional women's underwear, therapeutic and prophylactic underwear, massage effect element, applicator.*

## Вступ

На світовому ринку текстильного виробництва медичний текстиль утримує особливе місце. У державах з розвинутою текстильною промисловістю, виробництво медичного трикотажу, в середньому, становить близько 17% технічного текстильного ринку. На даний час трикотажні вироби медичного призначення мають великий попит у населення і з кожним роком асортимент товарів цього напрямку збільшується [1]. Поширюється попит на багатофункціональну білизну лікувально-профілактичного призначення. Зокрема особливість жіночої фізіології потребує специфічного підходу до організації праці та її забезпечення. Завдяки світовому прогресу роль жінок у сучасному суспільстві кардинально змінилася. Вони здобули більше свободи для реалізації себе у творчості, науці та громадській діяльності. Жіноча емансипація, розвиток технічного прогресу та, насамперед, погіршення демографічної ситуації у низці країн світу ставлять їх працю нарівні з чоловічою. Сучасна українська жінка задіяна в усіх сферах суспільної діяльності та виробництві, нині значна частина їх проходить військову службу. Тому дизайн-проектування багатофункціональної жіночої білизни з лікувально-профілактичними властивостями, що відповідають вимогам сучасності, безперечно є проявом уваги й турботи про жіноче здоров'я. Сьогодні трикотажні полотна користуються великою популярністю у виготовленні натільної білизни для жінок лікувально-профілактичної дії. Виробництво комфортної, безпечної, модної та багатофункціональної білизни для жінок як ніколи є актуальним та має глибоке соціальне значення.

## Постановка завдання

Слід зазначити, що застосування лікувально-профілактичних швейних виробів базується на сучасних науково-технічних відкриттях та використанні інформаційної медицини. Доступним і досить перспективним способом проведення рефлексотерапевтичного лікування залишається багатофункціональна трикотажна натільна білизна із розміщеними на ній засобами впливу на точки акупунктури. Адже використання такої білизни не передбачає регулярне втручання медпрацівників в умовах медичного закладу

та застосування високовартісних приладів та медичних препаратів.

Сьогодні в Україні розробляються різноманітні види лікувально-профілактичної жіночої білизни з трикотажу. Враховуючи вимоги споживачів, час від часу заявляються нові розробки та винаходи. Відомо, що сучасні медичні дослідження виявили зниження раціональності медикаментозного лікування та його негативний вплив на стан здоров'я жінки. «Сьогодні немає жодного лікарського препарату, який потенційно не є причиною лікарського, інтерстиційного нефриту», – зазначає доктор медицини В. І. Шулутко (1993 р.) [2]. Ось чому альтернативою стали фізичні методи лікування, зокрема – рефлексотерапія.

Таким чином, розв'язанню проблеми зниження больового синдрому при дисменореї у жінок може сприяти проектування і виробництво лікувально-профілактичного трикотажного виробу, зокрема трусів з накладкою у зоні задньої поверхні поперекового та крижового відділів хребта, лікувальний ефект яких досягається завдяки компресійним властивостям трикотажу та механічному впливу додатково розташованого елемента масажної дії, що впливає на біологічно активну зону в області попереку і крижів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Необхідно чітко уявляти, що особливості фізіології жінки потребують специфічного підходу до організації праці та її забезпечення. Ще наприкінці XIX ст. учений, лікар-гінеколог Д.О. Отт (1855–1929 рр.) сформував чітке значення закону періодичності хвилеподібних коливань напруження життєвих процесів в організмі жінки. У кожної здорової жінки, у репродуктивному віці, щомісяця з'являються критичні дні, які тривають 4–6 діб та впливають на її емоційний стан і здоров'я. Іноді процес триває болісно, що позбавляє жінку працездатності та потребує медичного втручання. Болі локалізуються в нижній частині живота, у попереку та крижах, і мають назву – дисменорея (dysmenorrhoea) [3, 4].

При порушенні функції одного органу обов'язково змінюються функції всіх інших органів і систем організму в цілому. З часом відпрацьовані та сформовані основні поняття, методи та засоби лікування давньо-східної медицини [4, 5], що базується на впливі на біологічно активні точки на тілі людини. Деякі з них, що дійшли до нас, не втратили своєї значущості донині. Біологічно активні точки (БАТ) на тілі людини давно вже виявлені, досліджені та ретельно систематизовані, описані їхні функції та взаємозв'язок з органами й системами людського організму. Вплив голкою, сигаретою зі стебла полину, шляхом натискання пальцями на певні точки, залежно від характеру захворювання, забезпечує відновлення порушених функцій й одужання хворого [4, 6]. Для отримання ефекту використовуються різні прийоми масажу: прогладжування, розминка або тиск пальцями з обертовими рухами у зоні розташування БАТ [2, 4, 6].

В Україні, завдяки проведенню численних науково-практичних досліджень, широко застосовується рефлексотерапія для профілактики захворювань та як альтернативне, безмедикаментозне лікування [4, 7]. Рефлексотерапія включає різноманітну кількість прийомів і методів впливу на біологічно активні точки (БАТ) та біологічно активні зони (БАЗ), забезпечує профілактику різних видів захворювань та створює умови для ефективного безмедикаментозного лікування [8].

Яскравим прикладом ефективного масового застосування рефлексотерапії за допомогою голкоаплікації є метод, запропонований Кузнецовим І.І. [9]. Найбільш вдалим варіантом став аплікатор з великою кількістю змінних пластмасових модулів з шипами, розташованими на еластичній основі. Основною умовою є накладання даного аплікатора на поверхню тіла людини з натисканням.

Цікавим варіантом проведення точкового масажу є аплікатор, виконаний у вигляді подушки [10]. Поверхня виробу містить виступаючі елементи, які чинять масажний вплив на БАТ і БАЗ шиї у статичному положенні голови. Форма і розмір виробу різноманітні і залежать від віку людини та завдань впливу на терапевтичні зони. По іншому працює виріб з механічним пристроєм. Масажна дія здійснюється за рахунок механічного впливу кулястих виступів шляхом автоматичного руху під оболонкою подушки. У цьому випадку вплив на БАТ и БАЗ шиї, спини більш інтенсивний [11].

Автори іншої роботи [12] у якості елементу одягу з масажними функціями пропонують використати комір пальта, на якому розташована масажна смуга. У смузі вмонтовано чип, за допомогою якого людина може посилювати або послаблювати вплив на БАТ шиї, що дозволяє знімати відчуття втоми та напруги на ділянці шийної зони.

У роботі [13] авторами запропоновані рукавиці для проведення точкового масажу БАТ і БАЗ рук. Опуклі масажні елементи, розташовані всередині виробу, забезпечують масаж зони впливу на долонях рук.

Найбільш поширеним видом лікувально-профілактичних швейних виробів є білизняні (спідні сорочки, кальсони, труси та інші). Білизна безпосередньо контактує з тілом людини, тому її використовують у повсякденному побуті цілодобово. Відомі різноманітні способи впливу на БАТ і БАЗ людини за допомогою трикотажної білизни лікувально-профілактичного призначення [14]. Винахід українських фахівців став прикладом розробки одягу лікувально-профілактичного призначення із застосування способу впливу на БАТ і БАЗ тіла людини енергетично-інформаційним шляхом [14]. У роботах [15, 16] авторами розроблені багатофункціональні трикотажні вироби у вигляді натільної білизни та чоловічих трусів відповідно з елементами впливу, зафіксованими на внутрішній поверхні виробів за допомогою накладок. У якості елементів впливу обрано срібні пластини, на які за допомогою репринтера записано інформацію лікувальних препаратів. Накладки з пластинами зафіксовані у тих місцях білизни, що є проекціями БАЗ тулуба та рук людини, які мають зв'язок з органами і системами, що відповідають за механізми виникнення стресу та стресових станів. Запатентована розробка [16] у вигляді чоловічих трусів з ефектом рефлексотерапії, призначена для профілактики хронічного простатиту.

Активно застосовуються також багатофункціональні швейні вироби, зокрема одяг та натільна білизна лікувально-профілактичного призначення, оздоровчий вплив у яких забезпечується за допомогою методу магнітотерапії. Метод заснований на прикладанні до точок акупунктури магнітів, розміщених, наприклад, у чоловічих трусах [17], що забезпечує вплив магнітного поля на органи малого тазу, або у жіночих трусах [18], які рекомендовано носити після пологів.

Таким чином, рефлексотерапія широко застосовується у виготовленні багатофункціональних виробів лікувально-профілактичної дії, у тому числі трикотажних. Тому основною задачею є розробка конструкції аплікатора та самої натільної білизни для забезпечення ефекту впливу на БАТ та БАЗ на тілі людини.

**Результати та їх обговорення**

Трикотажні вироби медичного призначення користуються великим попитом у населення, і з кожним роком асортимент товарів цього напряму збільшується. Зокрема в Україні завдяки проведенню чисельних науково-практичних досліджень, як у лікувальній, так і профілактичній практиці широко застосовується методика точкового масажу (впливу на БАТ) у виробництві лікувально-профілактичних виробів.

Численні клініко-фізіологічні дослідження, проведені в наш час, показали, що БАТ мають специфічні особливості, які відрізняють їх від оточуючих ділянок шкіри. При натисканні на ці точки, як правило, виникає своєрідне відчуття ломоти, оніміння, болю і відсутність їх при натисканні поза цими точками. Виникнення цих відчуттів настільки постійне й обов'язкове, що служить критерієм правильності знаходження точки. Натискаючи чітко на відповідні точки, можна дозовано, вибірково та спрямовано впливати на функції різних органів і систем, регулювати вегетативні функції, обмінні та відновлювальні процеси. Ефект точкового масажу можна забезпечити шляхом використання аплікаторів, що відрізняються за своєю конструкцією.

Відомій український лікар, мануальний терапевт Ляпко М.Г. став автором методу множинного голковколювання [19]. За допомогою голкових металевих аплікаторів, розміщених на тілі людини, здійснюється корекція функціонального стану організму людини, шляхом рефлекторного та масажного впливу. Винахід для стимулювання БАТ і БАЗ, розроблений на основі методу М. Г. Ляпко [19], включає в себе пружні бази і жорсткі модулі з шипами, розташовані один біля одного і з'єднані між собою (рис. 1). Форма шипів може відрізнятись залежно від необхідного типу точкового масажу. Пристрій можна активно використовувати при виконанні фізичних вправ, закріпивши його на предмети одягу. Така конструкція аплікатора на дає можливості використовувати його при повсякденній експлуатації натільної білизни.

**Рис. 1. Пластмасові змінні модулі з шипами**

Як зазначалося вище, у кожної здорової жінки дітородного віку виникає періодичний біль, що впливає на стан її здоров'я та емоційній фон. В окремих випадках процес триває досить болісно, що позбавляє жінку працездатності. Застосування рефлексотерапії шляхом точкового масажу певних зон дозволяє реалізувати безмедикаментозний спосіб усунення больових відчуттів. З метою розробки конструкції аплікатора, що забезпечуватиме точковий масаж, проаналізовано біологічно активну зону, що відповідає за локалізацію болю. Проекційне розташування цієї біологічно активної зони на тілі жінки, збігається з ромбом Міхаеліса, що представляє собою площадку ромбовидної форми на задній поверхні крижового відділу хребта. Вимірюється у положенні обстежуваної жінки стоячи та має межі (рис. 2 ):

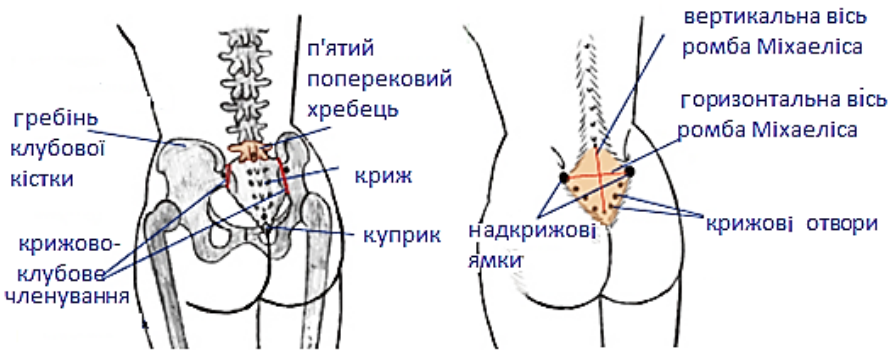



**Рис. 2. Проекція ромба Міхаеліса**

верхній кут ромба (надкрижова ямка) – це заглиблення між остистим відростком п'ятого

поперекового хребця і першим крижовим хребцем;

бокові кути відповідають заднім остям клубових кісток,

нижній кут – верхівка крижів;

зверху та ззовні ромб обмежений виступами великих спинних м'язів, знизу та ззовні – виступами сідничних м'язів.

Розміри ромба Міхаеліса: поздовжній – 11 см, поперечний – 10 см [20].

Розрізняють наступні форми крижового ромба: 1 – нормальний; 2 – плоскорахітичний таз; 3 – загально-рівномірно звужений таз; 4 – косозвужений таз [20]. При анатомічно вузькому тазі його форма та розміри змінені (рис. 3). Він має межі: верхній кут – поглиблення між остистим відростком V поперекового хребця і початком середнього крижового гребня; бічні кути – задні верхні ості клубових кісток; нижній кут – верхівка крижів; зверху і ззовні ромб обмежений виступами великих спинних м'язів; знизу і ззовні – виступами сідничних м'язів. Болі у ділянці крижового ромба вказують на ускладнення в гінекологічній сфері. Так, при патології матки – задіяна нижня ділянка поперекового та крижового відділів хребта в проекції ромба Міхаеліса.

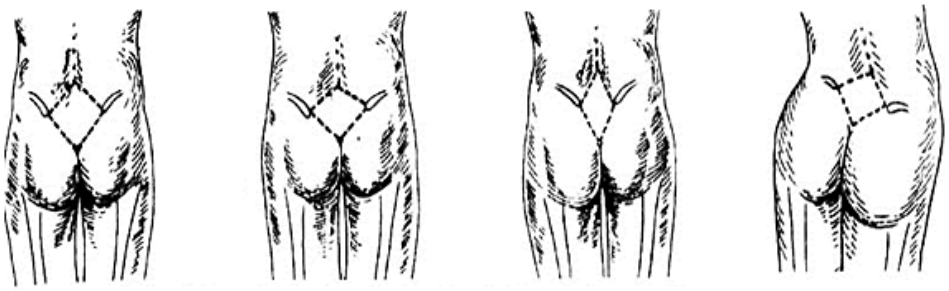



**Рис. 3. Форми ромба Міхаеліса**

Орієнтуючись на середньо статистичний розмір ромба Міхаеліса нами розроблено конструкцію аплікатора п'ятикутної форми. П'ятикутник вписуємо у прямокутник шириною 11 см та висотою 15 см та умовно поділяємо його на дві фігури. У результаті отримуємо рівнобедрений трикутник з довжиною сторони основи – 11 см та бічних сторін – 8 см (рис. 4), а також прямокутник зі сторонами 11 см та 7 см відповідно.

Точкову масажну дію аплікатора за умови повсякденної експлуатації виробу пропонується здійснювати шляхом механічного впливу кулькоподібних виступів на його поверхні. Зовні аплікатор представляє собою півкулі, які з'єднані між собою тонкою плоскою ниткою та створюють рельєфну поверхню (рис.5). Для вироблення півкуль пропонується застосувати полімер медичного призначення, що за стандартами передбачає безпосередній контакт зі шкірою людини. Підготовлений аплікатор пропонується закріпити до задньої частини капсули термоклейовим механічним способом у вигляді кишені, виготовленої з трикотажного полотна переплетення гладь (рис. 6).

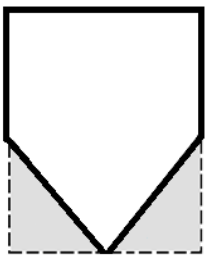


**Рис. 4. Лекало капсули – кишеня для аплікатора**

**Рис. 5. Стрічка з півкулями**

**Рис. 6. Аплікатор у кишені**

Важливим моментом у створенні багатофункціональних трусів з розміщеним на ньому аплікатором, що забезпечує масажну дію, є вибір їх конструкції. Залежно від періоду і думки громадськості модельєри міняли фасони трусів, крій, види мережив та стрічок, тощо. Але в усій історії жіночої білизни простежується один чіткий факт: у будь-якому віці, ситуації, фінансовому положенні, статусі, незалежно від моди, у гардеробі кожної жінки є класичні труси з високою посадкою. Залежно від глибини вирізу виділяють три основні типи трусів, що залежать від глибини вирізу: «міні» (mini), «міді» (midi) та «максі» (maxi). Кожний з них має безліч підтипів (рис. 7).

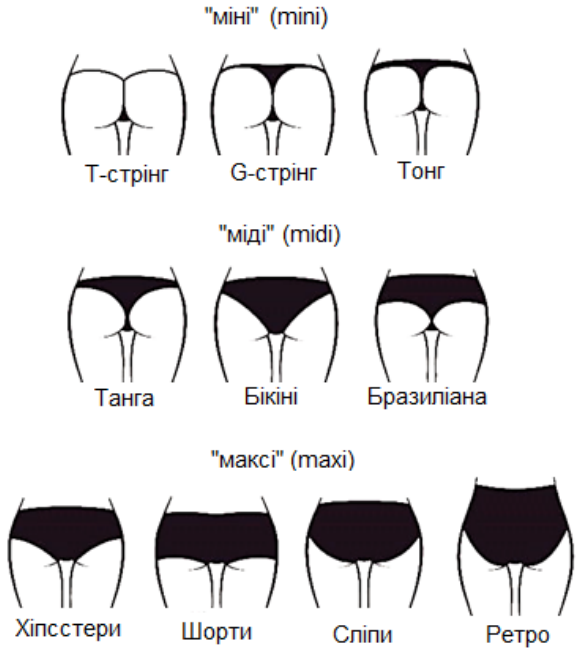



**Рис. 7. Види жіночої білизни**

Жіночі труси виду «Ретро» (класичні труси із завищеною лінією талії) є варіантом натільної білизни для коригування недоліків фігури на талії та стегнах. Деякі моделі мають висоту практично до грудей. Конструкція білизни з високою посадкою є однією з поширених моделей жіночої білизни. Тренд не новий для нижньої білизни, але з неї все ж таки почалася історія нашого століття. Нове життя моделі з завищеною лінією талії набули з початком розквіту індустрії трикотажу. Перевага білизни з високою посадкою полягає в тому, що вона добре облягає стегна, завдяки чому досягається плавний вигин жіночої фігури, візуально чітко підкреслюється лінія талії та стегон, тим самим досягається акцент на плавності ліній. У разі пишної фігури така модель допомагає «намітити» талію і підтягнути ділянку сідниць, зробивши її помітнішою, за потреби утягнувши живіт. Також такі конструкції моделей трусів є основою для деяких конструкцій білизни медичного призначення. На підставі проведеного аналізу пропонуємо використати модель трусів виду «Ретро», що забезпечить достатній ступінь прилягання аплікатора до тіла жінки, а також його чітке розташування в області крижового відділу (рис. 8, 9).

**Рис. 8. Форма аплікатора у зоні ромба Міхаеліса**

**а** **б**

**Рис. 9. Зовнішній вигляд виробу: а – вид ззаду (виворітна сторона), б – вид ззаду (лицьова сторона)**

Усі матеріали, що використовуються для виробництва білизни, мають бути безпечними для шкіри. Текстильні матеріали для виготовлення будь-якої білизни, у першу чергу, мають містити у своєму складі не менше 50 % натуральної сировини. Це одна з найважливіших вимог для будь-якого виробництва натільної білизни. Виходячи з цієї вимоги, для виготовлення трикотажу білизняного призначення запропоновано використати два види сировини: бавовняну пряжу та текстуровану поліамідну нитку з еластиновим сердечником. Для створення достатнього ступеня облягання та формостійкості полотна обрано комбіноване переплетення, у якому чергуються ряди переплетення інтерлок з рядами переплетення трубчаста гладь. Для виготовлення жіночих трикотажних трусів запропоновано круглов'язальне обладнання малого діаметра, що дозволяє уникнути бокових швів при пошитті виробу. Така особливість виготовлення забезпечує значний комфорт і високий ступінь облягання, що у свою чергу, збільшує максимальну дію аплікатора (рис. 9).

**Висновки**

У ході роботи проаналізовано сучасні підходи до створення багатофункціональної білизни лікувально-профілактичного призначення. Застосування виробів з масажним ефектом визнано одним з ефективних способів зняття болю, втоми й отримання заряду енергії. Так, проектування і виробництво лікувально-профілактичних трикотажних виробів, лікувальний ефект від яких досягається шляхом механічного впливу кулястих виступів на виробі у вигляді півкуль малого діаметра, що діють на окремі ділянки тіла в області попереку, сприяє вирішенню проблеми зниження періодичного больового синдрому у жінок.

За результатами проведеного дослідження результативність, зручність у користуванні спроектованого виробу лікувально-профілактичного призначення обумовлена вдалим вибором матеріалів для виготовлення білизни, розробкою форми та конструкції виробу, науково обґрунтованим за своїми властивостями, місцем розташування та розмірами елемента масажної дії, що створює позитивний вплив на стан здоров'я та емоційний фон жінки.

**Література**

1. Мельник Л. М. Застосування еластичних трикотажних матеріалів в лікувально-профілактичних виробах / Л. М. Мельник, О.П. Кизимчук // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2012. – № 4 (66). – С. 139–145.

2. Антонов И.П. Поясничные боли / И.П. Антонов, Г.Г. Шанько. – Изд. 2-е, доп. – Минск : Беларусь, 1989. – С. 114.

3. Офіційний сайт Української асоціації підприємств легкої промисловості «Укрлегпром» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ukrlegprom.org/ ua/analytics/

4. Мачерет Є. Л. Сучасний стан рефлексотерапії [Електронний ресурс] / Є. Л. Мачерет, О. Е. Коваленко, Г. М. Чуприна // Медичний портал MedikLab / Національна медична академія післядипломної освіти імені П. Л. Шупика. – Київ, 2012. – Режим доступу : http://mediclab.com.ua/index.php.newsid=14310

5. Тихонова Т. П. Технология разработки информационной базы для проектирования конструкций лечебно-профилактической одежды массажного действия / Т.П. Тихонова // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2010. – № 3 (53). – С. 198–201.

6. Кизимчук О.П. Удосконалений медичний трикотаж / О.П. Кизимчук, Л.М. Мельник, О.Я. Голікова // Інформаційно-комунікативний захід «Науково-технологічне забезпечення оборонно-промислового комплексу України». – Київ, 2014. – С. 75–79.

7. Медичний портал MedikLab [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://mediclab.com.ua/ index.php?newsid=14310

8. Бакалюк О.Й. Народна медицина світу: традиції, значення для сучасної медичної науки і практики [Електронний ресурс] / О.Й. Бакалюк, С.В. Дзига, Є.І. Давидович // Новости медицины и фармации. – 2012. – № 13-14. – С. 423-424. – Режим доступу : http://www.mifua.com/archive/article/31905

9. Пат. RU 2133602 РФ, A61H11/00, A61H39/00. Устройство для повышения работоспособности человека "Апликатор Кузнецова"/ И.И. Кузнецов. – № 97117010/14 ; заявл. 22.10.1997, опубл. 27.07.1999.

10. Пат. CN 104705851 China, МПК A61H 39/04, A41D 19/00. Healthcaregloves / He Yanling. – № 201310686311.3 ; заявл. 17.12.2013 ; опубл. 17.06.2015.

11. Офіційний сайт Компанії «US Melsca», 2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://us-medica.ua/about-us

12. Пат. CN 104366765 China, МПКA61H 23/02, A41D 31/02, A41D 27/00. Coat with neck massage function and excellent breathability / Huang Wenping. – № 201310350460.2 ; заявл. 13.08.2013 ; опубл. 25.02.2015.

13. Пат. WO 2015126001 Korean, МПК A47/G 9/10. Pillow for acupuncture point stimulation / Sun Jae Kwang. – № PCT/KR2014/002961 ; заявл. 07.04.2014 ; опубл. 27.08.2015.

14. Краснюк Л.В. Проектування одягу лікувально-профілактичного призначення [Електронний ресурс] / Л.В. Краснюк, О.М. Троян, О.Й. Янцаловський, В.С. Тороканець. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 53 с. – Режим доступу : http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/5847/1/Монографія _2017.pdf

15. Пат. UA 116472 Україна, МПК A41B 9/00, A41B 9/06, A61H 39/04. Лікувально-профілактична білизна з трикотажного полотна / Л. В. Краснюк, О. М. Троян, О. Й. Янцаловський, Є. М. Потапчук,

В.С. Тороканець. – № u201611699 ; заявл. 21.11.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

16. Пат. UA 101373 Україна, МПК A41B 9/02. Труси лікувально-профілактичні / О. М. Троян, О.Й. Янцаловський, О.М. Лущевська, Л.В. Краснюк. – № u201502183 ; заявл. 12.03.2015 ; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17.

17. Пат. CN 104664636 China, МПК A61N 2/08, A41B 9/02. Malemagne ticth erapyhealthunder wear / Wang Wenting. – №201410346906.9 ; заявл. 21.07.2014 ; опубл. 03.06.2015.

18. Пат. CN 104706454 China, МПК A61N 2/08, A61F 5/03. Postpartum abdomen-in underpants / Dong Chunling. – № 201310684401.9 ; заявл. 12.12.2013 ; опубл. 17.06.2015.

19. Пат. UA 32059 Україна, МПК A61H39/04. Спосіб корекції функціонального стану організму людини / М.Г. Ляпко. – опубл. 12.05.2008, Бюл. № 6.

20. Айламазян Э.К. Акушерство : учебник для медицинских вузов / Айламазян Э.К. – Изд. 7-е испр. и доп. – СПб : Спец. Лит, 2010. – С. 99.

**References**

1. Melnyk L.M. The utilization of elastic knitted materials in the medical-preventive goods / L.M. Melnyk, O.P. Kyzymchuk // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies & Design. – 2012. – No. 4 (66). – P. 139-145.

2. Antonov I.P., Shanko G.G. Lumbar pain. Ed. 2nd and add. Minsk, Belarus, 1989. – P. 114.

3. UKRLEGPROM official website [Electronic resource]. – Access mode: https://ukrlegprom.org/ua/analytics/

4. Macheret Ye.L. Modern state of reflexotherapy / Ye.L. Macheret, O.E. Kovalenko, H.M. Chupryna// Shupyk National Medical Academy of Postgraduate Education. K., 2012. [Electronic resource]. – Access mode: http://mediclab.com.ua/index.php.newsid=14310

5. Tikhonova T.P. Technology for the development of information base for the design of therapeutic and prophylactic clothing having a massage effect / T. P. Tikhonova // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies & Design. – 2010. – No. 3 (53). – P. 198-201.

6. Kyzymchuk O.P. Improved medical knitwear / O.P. Kyzymchuk, L.M. Melnyk, O.Ya. Holikova // Informational and communicational event "Scientific and technological support of the defense and industrial complex of Ukraine". – Kyiv. – 2014. – P. 75-79.

7. MedikLab medical portal. [Electronic resource]. – Access mode: http://mediclab.com.ua/index.php? newsid=14310

8. Bakalyuk O.Y. Folk medicine of the world: traditions, values for modern medical science and practice / O.Y. Bakalyuk, S.V. Dzyha, Ye.I. Davydovych // Newspaper "News of Medicine and Pharmacy", 2012. – No. 13-14. – P. 423-424. [Electronic resource] – Access mode: http://www.mifua.com/archive/article/31905

9. Pat. RU 2133602 RF, A61H11/00, A61H39/00.Device for enhancing human performance "Kuznetsov Needle Applicator"/ I.I. Kuznetsov. No.97117010/14; appl. 22.10.1997, publ. 27.07.1999.

10. Pat. CN 104705851 China, IPC A61H 39/04, A41D 19/00. Healthcareg loves / He Yanling. – No. 201310686311.3; appl. 17.12.2013; publ. 17.06.2015.

11. US Melsca official website, 2018 [Electronic resource]. – Access mode: https://us-medica.ua/about-us

12. Pat. CN 104366765 China, IPC A61H 23/02, A41D 31/02, A41D 27/00. Coat with neck massage function and excellent breathability/ Huang Wenping. – No.201310350460.2; appl. 13.08.2013; publ. 25.02.2015.

13. Pat. WO 2015126001 Korean, IPC A47/G 9/10. Pillow for acupuncture point stimulation / Sun Jae Kwang. – № PCT/KR2014/002961; appl. 07.04.2014; publ. 27.08.2015.

14. Krasnyuk L.V. Designing therapeutic and prophylacticclothes. / L.V. Krasnyuk, O.M. Troyan, O.Y Yantsalovskyy, V.S. Torokanets // Khmelnytskyi: Khmelnytskyi National University, 2017. – [Electronic resource]. – Access mode: http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/5847/1/Монографія_2017.pdf

15. Пат. UA 116472 Ukraine, IPC A41B 9/00, A41B 9/06, A61H 39/04 Therapeutic and prophylactic linen from a knitted fabric / L.V. Krasnyuk, A. M. Troyan, A. Y. Yantsalovsky, E. M. Potapchuk, V. S. Torokanets. – №u201611699; appl. 21.11.2016; publ.25.05.2017, Bul. № 10.

16. Pat. UA 101373 Ukraine, IPC A41B 9/02 Therapeutic and prophylactic underpants / O. M. Troyan, O. Y. Yantsalovskyy, O.M. Lushevska, L.V. Krasnyuk. – No.u201502183; appl. 12.03.2015; publ. 10.09.2015, Bul. № 17.

17. Pat. CN 104664636 China, IPC A61N 2/08, A41B 9/02, Malemagnetic therapy health underwear / Wang Wanting. – No.201410346906.9; appl. 21.07.2014; publ. 03.06.2015.

18. Pat. CN 104706454 China, IPC A61N 2/08, A61F 5/03 Postpartum abdomen-in underpants / Dong Chunling. – No.201310684401.9; appl. 12.12.2013; publ. 17.06.2015

19. Pat. UA 32059 Ukraine, IPC A61H39/04. A method of correction of the functional state of the human body / M. G. Lyapko. publ. 12.05.2008, Bul. No. 6.

20. Aylamazyan E.K. Obstetrics: a textbook for medical schools. Ed. 7th rev. and add. SPb: Spec. Leet, 2010. – C. 99.

Рецензія/Peer review : 11.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Березненко С.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-51-54
УДК 678.742.3:621.798

Р.Ш. ІСКАНДАРОВ, Б.М. САВЧЕНКО, Н.В. СОВА, О.О. СЛЄПЦОВ
Київський національний університет технологій та дизайну

# БЕТТА НУКЛЕЙОВАНИЙ ПОЛІПРОПІЛЕН ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ПАКУВАННЯ З МОДИФІКОВАНОЮ АТМОСФЕРОЮ

*Стаття присвячена особливостям кристалізації поліпропілену та створенню мікропористих плівок на його основі. Упаковка з модифікованою атмосферою – це інноваційна технологія пакування з використанням мікропористих плівок, зокрема на основі поліпропілену. Отримання бетта нуклейованого поліпропілену та мікропористих плівок на його основі – нова ефективна технологія, яка дозволяє просто регулювати мікропористість отримуваних плівок та забезпечувати належну якість упаковки.*

***Ключові слова**: поліпропілен, кристалічна форма, упаковка з модифікованою атмосферою, нуклеатор, мікропориста плівка.*

R.SH. ISKANDAROV, B.M. SAVCHENKO, N.V. SOVA, O.O. SLIEPTSOV
Kyiv National University of Technology and Design

## BETA NUCLEATED POLYPROPYLENE AS A PERSPECTIVE MATERIAL FOR PACKAGING WITH MODIFIED ATMOSPHERE

*Modified atmosphere packaging has been an innovative technology to meet the consumer's demand for more natural and fresh foods. Packaging products in a modified atmosphere can significantly improve the shelf life of the product, but it is vital that the right packaging material. This paper reviews the literature on the scientific basis of these claims. Modified-atmosphere packaged foods have become increasingly common, as food manufacturers have attempted to meet consumer demands for fresh, refrigerated foods with extended shelf life. Atmospheric conditions inside the packaging material depend on its permeability, packaging films are chosen depending on the individual needs and characteristics of the different food products. In modified atmosphere packaging, a key factor in the choice of the barrier material is the rate at which gases can pass through it – its permeability. This is a popular choice as it seals well through a degree of contamination and has good anti-fogging and peel-ability characteristics. To meet the desired film properties for modified atmosphere packaging, the various plastic films are either laminated or coextruded. But the use of a beta-polypropylene film is an alternative to these methods. In this modern world, the packaging films of the required gas transmission properties are made available through advanced technology. This technology may lead to a significant increase in the range of products packaged in modified atmospheres. Main aspects of existing technology and main the principles of cavitation foaming are discussed. Cavitation foaming by beta nucleated polypropylene are described as the main goals for further study.*

***Keywords**: polypropylene, crystalline form, modified atmosphere packaging, nucleate, microporous film.*

### Вступ

Упаковка з модифікованою атмосферою використовується для зберігання свіжої продукції та її характеристики залежать від модифікації атмосфери всередині упаковки, досягнутої природною взаємодією двох процесів: частоти дихання товару та проникності пакувальної плівки. Упаковка з модифікованою атмосферою – це перевірена технологія для зберігання натуральної та свіжої їжі, яка розвивається з кожним днем. Завдяки динамічному явищу дихання і проникнення відбуваються одночасно, що зумовлює вибір відповідної полімерної системи для досягнення бажаної атмосфери і підтримування її якомога довше. У сучасному світі пакувальні плівки з необхідними властивостями для транспортування газу отримують за допомогою передових технологій. Незважаючи на те, що у промисловості виробництво упаковки з модифікованою атмосферою зростає, більшість пакувальних матеріалів все ще виготовляється з чотирьох основних полімерів, серед яких поліпропілен (ПП) є найперспективнішим полімерним матеріалом [1].

### Постановка задачі

З метою обґрунтування вибору вивчення проблеми атмосферного пакування було розглянуто ринок пакування. Ринок товарів характеризується високим рівнем конкуренції, де кожен виробник прагне максимально привернути увагу споживачів та отримати максимальний прибуток. Підвищення ролі пакування зумовлене збільшенням асортименту продукції та потреби продовження терміну зберігання товарів. З'являються нові пакувальні матеріали та способи пакування. Роль упаковки у сучасному світі постійно зростає. Пакування запобігає псуванню, а також полегшує транспортування продукції для наступної реалізації. Конкуренція змушує виробників розробляти якісні та недорогі пакувальні матеріали.

В концепції пакувальних матеріалів також виділяється проблема вузькоспеціалізованого пакування. Адже дуже важливо на етапі розроблення нового пакувального матеріалу визначитися з асортиментом товарів та закласти можливості для збільшення діапазону використання.

### Викладення основного матеріалу

Поліпропілен (ПП) – це синтетичний термопластичний неполярний полімер з класу поліолефінів. Є одним з найрозповсюджених та кращих матеріалів для виготовлення харчових контейнерів, який відрізняється високими конструкційними, хорошими бар'єрними властивостями і дозволяє проводити стерилізацію в упаковці. Високі бар'єрні властивості забезпечують зберігання аромату продукту в упаковці з поліпропілену [2].

Однією з важливих особливостей які впливають на властивості поліпропілену, є здатність до кристалізації та утворення різних кристалічних структур. Полімери можуть кристалізуватися при

охолодженні розплаву нижче температури склування. Кристалізація полімерів є мимовільним процесом, який також відбувається і при орієнтаційному витягуванні. Це істотно впливає на механічні та інші властивості поліпропілену. В кінцевому виробі ступінь кристалічності залежить від швидкості охолодження, а також від молекулярно-масового розподілу та типу ПП. Також окремо можна виділити кристалізацію під час орієнтаційного витягування полімерів (рис. 1).

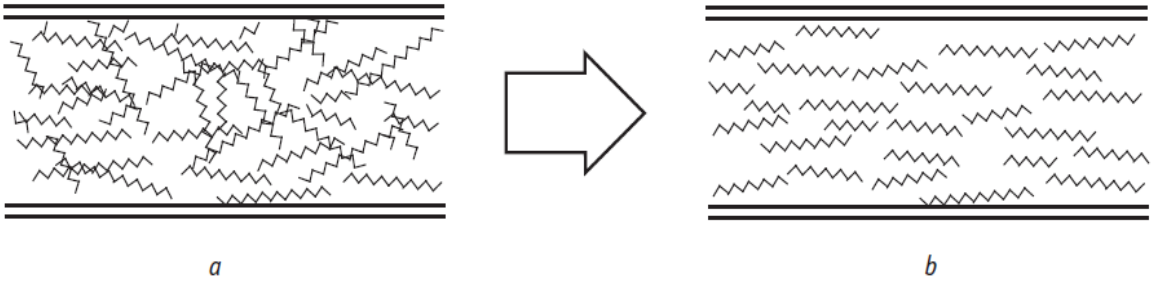



**Рис. 1. Орієнтація макромолекул під час процесу орієнтаційного витягування: a – до витягування, b –після витягування**

Цей ефект викликаний орієнтацією осей макромолекул в напрямку витягування, що призводить до збільшення ступеня кристалічності полімеру. Викликані зміни обумовлюються збільшенням кристалічності при витягуванні полімеру, і можуть проявлятись більше, ніж зміни, зумовлені появою анізотропії внаслідок орієнтації [3].

Також поліпропілен володіє властивістю поліморфізму. Це значить, що він може кристалізуватися в трьох видах різних кристалічних структур (α, β, і γ). Для отримання тієї або іншої кристалічної структури використовують агенти нуклеації, які можуть привести до кристалізації ПП в одній зі своїх менш поширених форм, і це має значний вплив на фізичні властивості в кінцевому виробі [4].

Найбільш поширена кристалічна форма ПП – альфа-кристали моноклинної форми. Під час виробництва плівкових матеріалі, більше 95% кристалів є типу альфа. Менш поширена форма, відома як бета або гексагональна форма кристалів, як правило, складає менше 5% кристалів. Гамма-кристалічна форма є рідкісною та отримати її в промислових масштабах під час виготовлення ПП продукції практично неможливо [5].

Процес кристалізації протікає за так званим механізмом нуклеації і складається з ряду послідовних стадій:

нуклеація;

зростання центрів нуклеації;

вдосконалення структури всередині утвореної фази (вторинна кристалізація).

Розрізняють три типи нуклеації: мимовільна гомогенна, гетерогенна і орієнтаційна.

Гомогенна нуклеація відбувається при зниженні температури нижче температури плавлення. В цьому випадку відбувається мимовільна агрегація полімерних ланцюгів. При досягненні критичних розмірів агрегатів агрегація стає незворотною – виникають центри кристалізації. Температура, при якій утворюються стійкі агрегати – температура кристалізації.

Гетерогенна нуклеація виникає завдяки присутності в рідкій фазі агентів нуклеації (нуклеаторів). У технологічній практиці це найважливіший прийом регулювання надмолекулярної структури полімерів. Процес нуклеації показаний на рис. 2.

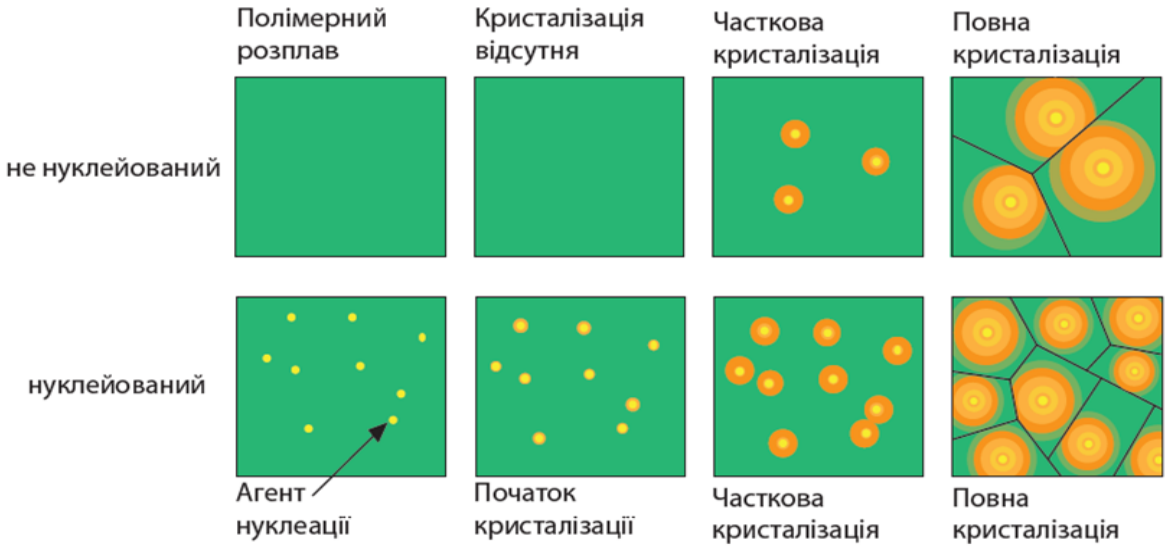



**Рис. 2. Зародження і зростання сферолітів в розплаві при кристалізації ПП**

Орієнтаційна нуклеація – процес, який передбачає упорядкування молекул при деформації розтягування. Цей процес має велике значення при переробці термопластів (плівок).

З виникненням центрів кристалізації процес кристалізації йде мимовільно. Кількість центрів кристалізації і розмір кристалітів залежать від температури і швидкості охолодження полімеру.

Для отримання бетта кристалічної структури полімеру використовується гетерогенна нуклеація за допомогою нуклеаторів. Нуклеатори – речовини, які зумовлюють нуклеацію (утворення зародків кристалітів), що водять в розплав для регулювання ступеня кристалічності.

Серед нуклеюючих агентів для α-нуклеації ПП виділяють найбільш ефективні: сіль органічного фосфату, дикарбонові кислоти. Ці нуклеатори сприяють утворенню моноклінної кристалічної структури. Така модифікація, як показують дослідження, відрізняється підвищеною жорсткістю і міцністю. Нуклеатори γ-кристалічної форми – червоний хінакрідоновий пігмент, n, n-дициклогексил-2,6-нафталін дикарбоксамід, призводять до підвищеного вмісту гексагональної кристалічної фази, що зумовлює підвищення ударної в'язкості і невелике зниження жорсткості полімеру.

Нуклеатори можуть вводитись безпосередньо в ПП, з подальшим диспергуванням в розплаві. Інший спосіб – це утворення нуклеатору в процесі взаємодії добавок при компаундуванні полімеру, наприклад, стеарат кальцію та пімелінова кислота, які утворюють пімелат кальцію [4, 6].

Вміст бета-кристалічної фази залежить від активних і селективних якостей бета-нуклеатору і від температури, при якій полімер кристалізувався. Також важливим фактором, що впливає на ступінь мікроспінювання, є температура, за якої відбувається орієнтаційне витягування. При зниженні температури витягування утворюється більша кількість мікропорожнин [7].

Таблиця 1

**Властивості бетта та альфа кристалічних фаз поліпропілену**

| Властивість | α-ПП | β-ПП |
|---|---|---|
| Температура плавлення кристалічної фази , °С | 160-165 | 151-153 |
| Модуль пружності, ГПа | 2,0 | 1,8 |
| Межа текучості, МПа | 36,5 | 29,5 |
| Міцність при розриві, МПа | 39,5 | 44 |
| Подовження при розриві,% | 420 | 480 |
| Вміст мікропорожнин, % об. | 0 | 0-80 |

Дані табл. 1 показують основні механічні властивості альфа та бетта кристалічних фаз поліпропілену, вміст мікропорожнин залежить від швидкості орієнтації та охолодження плівкового чи листового матеріалу.

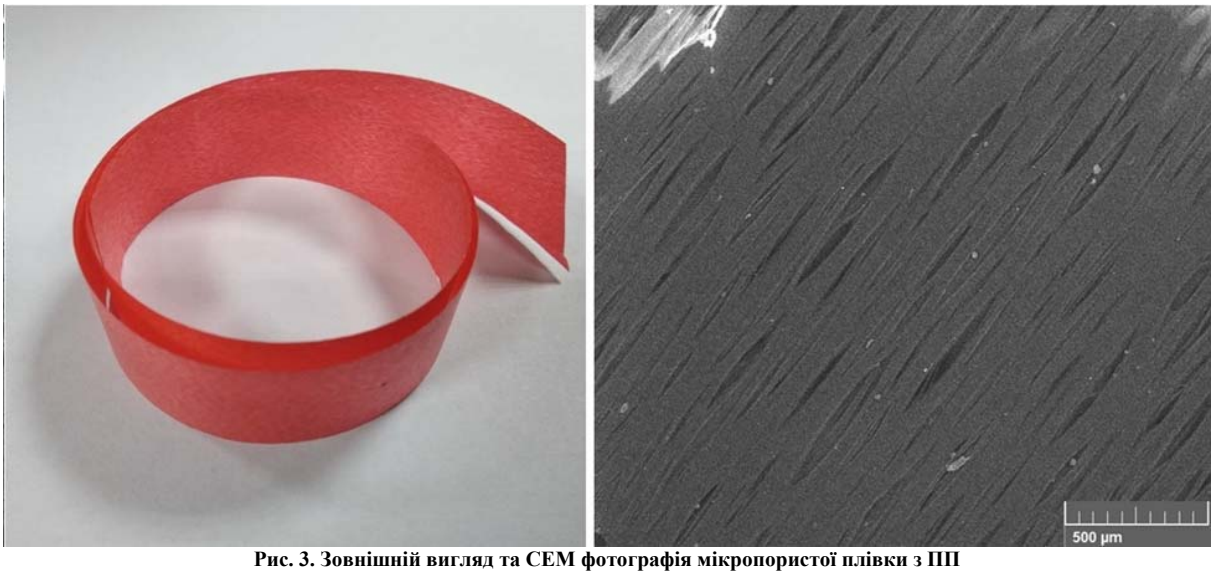



**Рис. 3. Зовнішній вигляд та СЕМ фотографія мікропористої плівки з ПП**

Плівки з цією характеристикою є повітропроникними. Використовуючи дану технологію можливо отримувати плівкові матеріали, через які газоподібні речовини можуть легко проходити при високих швидкостях, при цьому блокуються рідини та мікроорганізми. Застосування даного типу плівок призведе до вдосконалення технології отримання пакування з контрольованою та модифікованою атмосферою.

**Висновки**

Застосування бетта-нуклейованого поліпропілену у виробництві мікропористих плівок та листових матеріалів з покращеними міцнісними характеристиками має інноваційний характер виробництва та просту технологію рециклінгу за рахунок моно-складу плівки. Бета-нуклейований поліпропілен дозволяє

отримувати високомікропористі плівки, в яких розмір мікропорожнини є унікальним та не може бути досягнутий за допомогою інших методів, які використовуються для виготовлення мікропористих плівок.

Данна технологія дозволяє отримувати пористі матеріали з широким вмістом мікропорожнин 0–80 % об'ємних, що значно збільшує асортимент товарів для пакування та надає варіативності використання пакування з модифікованою атмосферою.

**Література**

1. Mangaraj S. Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review / S. Mangaraj, T. K. Goswami, P. V. Mahajan // Springer-Verlag. – 2009. – № 1. – P. 1–133.

2. Jones T. A. Crystalline forms of isotactic polypropylene / T. A. Jones, J. M. Aizlewood, R. D. Beckett // Macromolecular Chemistry and Physics. – 1964. – № 75. – P. 134–158.

3. Макаров А. А. Ориентирования полимерных композиционных пленок / А. А. Макаров, С. В. Власов. // Полимерные материалы. – 2004. – № 2. – С. 8–11.

4. Jacoby P. Beta Nucleation of Polypropylene Properties, Technology, and Applications / Philip Jacoby. – Waltham: William Andrew is an imprint of Elsevier, 2014. – (1).

5. Jacoby P. Beta nucleating masterbatch offers enhanced properties in polypropylene products / Philip Jacoby. // William Andrew is an imprint of Elsevier. – 2007. – P. 32–35.

6. К вопросу о нуклеировании трубных марок сополимеров пропилена с этиленом / [А. В. Куличенко, О.Б. Ушакова, А. Н. Иванов и др.] // Полимерные трубы. – 2010. – № 4. – С. 33–35.

7. Tensile behaviour of isotactic polypropylene modified by specific nucleation and active fillers / J. Kotek, I. Kelnar, J. Baldrian, M. Raab // European Polymer Journal. – 2004. – P. 679–684.

**References**

1. Mangaraj S. Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review / S. Mangaraj, T. K. Goswami, P. V. Mahajan // Springer-Verlag. – 2009. – № 1. – P. 1–133.

2. Jones T. A. Crystalline forms of isotactic polypropylene / T. A. Jones, J. M. Aizlewood, R. D. Beckett // Macromolecular Chemistry and Physics. – 1964. – № 75. – P. 134–158.

3. Makarov A. A. Orientirovaniya polimernyh kompozicionnyh plenok / A. A. Makarov, S. V. Vlasov. // Polimernye materialy. – 2004. – № 2. – S. 8–11.

4. Jacoby P. Beta Nucleation of Polypropylene Properties, Technology, and Applications / Philip Jacoby. – Waltham: William Andrew is an imprint of Elsevier, 2014. – (1).

5. Jacoby P. Beta nucleating masterbatch offers enhanced properties in polypropylene products / Philip Jacoby. // William Andrew is an imprint of Elsevier. – 2007. – P. 32–35.

6. K voprosu o nukleirovanii trubnyh marok sopolimerov propilena s etilenom / [A. V. Kulichenko, O.B. Ushakova, A. N. Ivanov i dr.] // Polimernye truby. – 2010. – № 4. – S. 33–35.

7. Tensile behaviour of isotactic polypropylene modified by specific nucleation and active fillers / J. Kotek, I. Kelnar, J. Baldrian, M. Raab // European Polymer Journal. – 2004. – P. 679–684.

Рецензія/Peer review : 14.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Будаш Ю. А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-55-59
УДК 685.34.072.017

І.М. ГРИЩЕНКО, А.Г. ДАНИЛКОВИЧ, Н.В. ПЕРВАЯ
Київський національний університету технологій та дизайну

# ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШКІРИ ДЛЯ ВЕРХУ ВЗУТТЯ

*В роботі досліджено вплив методів мінерального і органічного дублення на комплекс фізико-механічних, теплофізичних та гігієнічних властивостей шкіряних матеріалів з сировини шкур свиней. Діальдегідний метод дублення з наступним наповнюванням полімером аніонного типу забезпечує формування однорідної пористої структури шкіряного матеріалу в різних топографічних ділянках з необхідним комплексом функціонально-експлуатаційних властивостей. Отримані шкіри можуть бути рекомендовані для виготовлення виробів широкого асортименту, у тому числі діальдегідного методу дублення – для виробів осінньо-зимових, а хромового методу дублення – для виробів весняно-літніх.*

*Ключові слова: сировина шкур свиней, методи дублення, фізико-механічні, теплофізичні, гігієнічні властивості.*

I.M. GRYSHCHENKO, A.G. DANYLKOVYCH, N.V. PERVAIA
Kyiv National University of Technologies and Design

**STUDY OF THE FUNCTIONAL AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF leather for uppers of footwear**

*The article discusses the functional and performance characteristics of leather for uppers of footwear. These properties were characterized by a combination of physic-mechanical, thermophysical, and hygienic properties. Indicators of these properties depended on tanning methods and topographical areas of leather. All samples had good physic-mechanical properties and were characterized by uniformity of strength along and perpendicular to the spine line. Leather dialdehyde tanning had the maximum value of the relative elongation under tension and deformation at a stress of 9.8 MPa than that of vegetable tanning. Hygienic and thermophysical properties of leather in various topographic areas were estimated by the density and porosity of the sample structure, vapor permeability, thermal conductivity, as well as thermal resistance and heat absorption. Leather of dialdehyde tanning has the highest vapor permeability, and the minimum vapor permeability has the leather of chrome tanning. The results of the study of the thermophysical properties of the skin showed their dependence on the tanning method. Leather of dialdehyde tanning has the maximum value of thermal resistance and the minimum value of heat absorption coefficient and heat conductivity. Leather of vegetable tanned method has a maximum coefficient of heat absorption and thermal conductivity. The study of the functional and performance characteristics of leather for uppers for footwear with different tanning methods showed that these skins can be recommended for the manufacture of a wide range of products, including the leather of dialdehyde tanning - for autumn-winter goods, and the leather of chrome tanning - for spring-summer goods.*

*Keywords: pigskin; tanning methods; physico-mechanical, thermal, hygienic properties.*

b

Євроінтеграційні процеси і державна стратегія розвитку України обумовлюють вирішення завдань, що стоять перед шкіряною промисловістю, пов'язаних із збільшенням виробництва шкіряних матеріалів з натуральної сировини та виробів з них згідно зі світовими стандартами для їх реалізації на внутрішньому та зовнішньому ринках. Для розв'язання цієї проблеми необхідний інтенсивний розвиток вітчизняної сировинної бази, активізація виробництва та ринків збуту готової продукції [1].

Сьогодні в Україні одним з джерел зростання сировинної бази для шкіряного виробництва є тваринництво, насамперед свинарство, на долю якого припадає понад 30 % загального її обсягу. Це пов'язано з його зростанням, яке зумовлено біологічними особливостями тварин цього виду [2]. Незважаючи на значну пористість, неестетичну крупнозернисту мережівку лицьової поверхні матеріалу, шкури свиней використовують для виготовлення майже всіх видів шкіряних товарів – шкіри для верху та низу взуття, лимарно-сідельні, галантерейні, технічні тощо [3]. Одним із основних аспектів вирішення проблеми можна вважати розроблення наукових основ ефективного використання шкіряних матеріалів, виготовлених за різними економіко-екологічними технологіями з цього виду сировини [4]. З товарознавчої точки зору шкіряні матеріали, залежно від умов експлуатації повинні відповідати комплексу фізико-механічних, теплофізичних і гігієнічних властивостей. При цьому комфортні властивості виробів [5] визначаються ефективним виконанням всіх стадій технологічного процесу виробництва шкіряних матеріалів. В першу чергу це стосується процесів дублення напівфабрикату шкур свиней.

Відомі результати дослідження [6, 7] щодо впливу методів дублення – хромового, танідного та хромтанідного при виготовленні шкір з овчини на їх фізико-механічні властивості. Автори встановили, що шкіри хромового і хромтанідного методів дублення характеризуються більш високим комплексом експлуатаційних властивостей при виготовленні конкретних одягових виробів. Доведена велика різниця у властивостях шкіряних матеріалів при зміні технології і виду дубителя [7], оскільки при формуванні об'ємних конструкцій виробів з плоских шкір, вони піддаються різним механічним напруженням, які необхідні для зміни зовнішньої форми відповідних виробів [8].

За результатами дослідження комфортних властивостей [9] шкіряних матеріалів з овчини, виготовлених з використанням мінеральних і органічних дубителів встановлено, що шкіри глутаральдегідного дублення характеризуються найвищим тепловим опором, що зумовлено підвищеною пористістю. В той час як шкіри хромового методу дублення мають низький тепловий опір. Шкіри танідного

дублення проявляють найвищу теплопровідність з низькою поглинаючою здатністю. Автори відзначають, що найвищу паропроникність мають шкіри цирконієвого методу дублення. На основі проведеного дослідження комфортних властивостей шкір різних методів дублення автори рекомендують для експлуатації виробів при низьких температурах використовувати матеріали глутаральдегідного дублення, а в умовах підвищених температур – вироби із шкіряних матеріалів цирконієвого дублення.

У даній роботі наведені результати дослідження впливу найбільш поширеніших методів дублення напівфабрикату з сировини шкур свиней на комплекс фізико-механічних, теплофізичних і гігієнічних властивостей та структуру отриманих шкіряних матеріалів.

**Експериментальна частина**

У роботі використаний напівфабрикат після зоління і міздріння (голина) 10 шкур свиней середньої площі 0,8–0,9 м$^2$ масою 31 кг, отриманий за технологією [10] в умовах дослідного цеху приватного АТ «Чинбар». З голини сформовано чотири партії за методом чергування половинок [11]. Стандартними точками відбирання проб для дослідження фізико-хімічних показників були точка Н (топографічно знаходиться в огузковій частині шкіри) та точка О (характеризує збіжність, а саме зменшення товщини шкіри в напрямі від воротка до полів) [12] і точка П, що розташовувалась у центрі ділянки поли.

Технологічні процеси проводили у барабані фірми Doze 30239 (Німеччина) об'ємом 0,39 м$^3$. Процеси дублення голини з сировини шкур свиней для всіх технологічних варіантів виконували після проведення переддубильних процесів, особливості яких наведено в табл. 1. Для синтетичного і рослинного методів дублення в кінці пікелювання pH розчину коригують форміатом натрію до 4,0. Слід відзначити, що пікелювання голини для діадьдегідного дублення проводили при вищому значенні pH=3,8–4,0 без додавання сірчаної кислоти.

Таблиця 1

**Переддубильні процеси для всіх варіантів дублення голини сировини шкур свиней**

| Процес | Реагент оброблення | Витрата, % | Тривалість, хв | pH |
|---|---|---|---|---|
| Промивання голини | Вода (початкова температура 22–25 °С, кінцева – 38 °С); зміна води через 20 хв | 400 | 40 | |
| Знезолювання-знежирювання-м`якшення | Вода 38 °С | 100 | | |
| | Сульфат амонію | 2,5 | 10 | |
| | Форміат натрію | 1,0 | 10 | |
| | Неіоногенна ПАР | 1,0 | 20 | |
| | Протеолітичний фермент | 0,6 | 40 | 7,6–8,0 |
| Промивання | Вода (початкова температура 26–28 °С, кінцева – 20 °С) | 200 | 30 | |
| Пікелювання | Вода 20–22 °С | 70 | | |
| | Хлорид натрію | 5,0 | 10 | |
| | Форміат натрію | 1,0 | 10 | |
| | Жирувальна емульсія електролітостійка | 1,0 | 20 | |
| | Мурашина кислота 1:10 | 0,5 | 20 | |
| | Сірчана кислота 1:10 (3×15 хв) | 1,0 | 60 | 2,8–3,2 |

Примітка. Швидкість обертання барабана 12–15 хв$^{-1}$.

Процеси дублення наведені в табл. 2. Хромове дублення голини (Д1) відзначається дозуванням хромового дубителя у відпрацьований пікельний розчин, основність якого підвищувалась після повного профарбування голини. Отриманий напівфабрикат мав температуру зварювання ($T_З$) 105 °С. Синтетичне дублення голини (Д2) відрізняється від хромового попереднім дозуванням жирувальної емульсії та використанням реагентів фірми BASF (Німеччина): препарату конденсації ароматичних сульфокислот Tamol M, препаратів конденсації на основі меланіну Relugan D та сильфону і ароматичних сульфокислот Basyntan MLB, а на заключній стадії дублення алюмінієво-калієвого галуну. $T_З$ отриманого напівфабрикату відповідала 85 °С. Рослинне дублення (Д3) на відміну від синтетичного передбачає використання танідів квебрахо з сульфітом натрію. $T_З$ була 84 °С. Суттєвою відмінністю діальдегідного дублення (Д4) від попередніх варіантів є використання глутарового діальдегіду в два прийоми і процес завершується при дещо вищому pH робочого розчину з наступною нейтралізацією. $T_З$ = 82 °С. Напівфабрикат всіх варіантів дублення направлявся на пролежування протягом 24 год.

Наступні процеси і операції для всіх варіантів дублення проводили після віджимання напівфабрикату до вологості 55–60 % і стругання на товщину 1,4–1,5 мм (табл. 3). Струганий шкіряний напівфабрикат, отриманий за всіма варіантами дублення, підлягав нейтралізації та додублюванню полімером аніонного типу Relugan RE, віджиманню, термо-деформаційному обробленню на розвідній машині моделі 07754 фірми Svit (Чехія), сушильно-зволожувальним процесам і операціям та вібраційно-деформаційним обробленням на машині Mollisana фірми Svit (Чехія). Після кінцевого оздоблювання напівфабрикату отримувався шкіряний матеріал різних методів дублення.

Таблиця 2

**Умови процесу дублення голини з сировини шкур свиней**

| Метод дублення | Реагент оброблення | Витрата, % | Тривалість, год | pH |
|---|---|---|---|---|
| Хромовий | Відпрацьований пекельний розчин 20–22 °С | 70 | | |
| | Хромовий дубитель (36–42 %) | 7,2 | 3,0 | |
| | Форміат натрію | 0,5 | 0,33 | |
| | Карбонат натрію (3×15 хв) | 0,4 | 1,0 | 4,0–4,2 |
| Синтетичний | Вода 28–32 °С | 50 | | |
| | Жирувальна емульсія електролітостійка | 2 | 0,33 | 5,8–6,0 |
| | Синтин-диспергатор Tamol M | 2 | 0,25 | |
| | Relugan D +Basyntan MLB | 5+5 | 6,0 | |
| | Алюмінієво-калієвий галун | 5 | 0,5 | 4,0–4,2 |
| Рослинний | Вода 28–32 °С | 50 | | |
| | Жирувальна емульсія електролітостійка | 2 | 0,33 | 5,8–6,0 |
| | Синтин-диспергатор Tamol M | 1 | 0,25 | |
| | Квебрахо + сульфіт натрію | 10+1,0 | 8,0 | |
| | Алюмінієво-калієвий галун | 5 | 0,5 | 4,2 |
| Діальдегідний | Вода 20–22 °С | 80 | | |
| | Хлорид натрію | 5 | 0,6 | |
| | Глутаровий діальдегід | 2 | 0,5 | |
| | Глутаровий діальдегід | 2 | 3,0 | |
| | Форміат натрію | 1,0 | 0,33 | |
| | Бікарбонат натрію (2×15 хв) | 0,5 | 1,0 | |
| | Бікарбонат натрію (2×15 хв) | 0,5 | 0,5 | 4,5 |
| | Нейтралізація: вода 40 °С | 100 | | |
| | Форміат натрію | 1,0 | 0,66 | 5,0 |

Примітка. Швидкість обертання барабана 15–17 хв$^{-1}$.

Таблиця 3

**Умови процесу додублювання напівфабрикату з сировини шкур свиней**

| Процес | Реагент оброблення | Витрата, % | Тривалість, год | pH |
|---|---|---|---|---|
| Промивання | Вода 35 °С | 120 | 15 | |
| Нейтралізація | Вода 35 °С | 120 | | |
| | Форміат натрію (2×15 хв) | 1,0 | 0,5 | |
| | Бікарбонат натрію (2×15 хв) | 0,7 | 1,0 | 5,0 |
| Додублювання | Вода 40 °С | 60 | | |
| | Синтин-диспергатор Tamol M | 1,0 | 4 | |
| | Полімерний дубитель Relugan RE | 5,0 | 0,5 | |
| | Вода 55 °С | +150 | | |
| | Жиру вальна композиція | 10 | 1,0 | |
| | Алюмінієво-калієвий галун | 5 | 0,5 | 4,2 |
| Промивання | Вода 20–22 °С | 200 | 10 | |

Примітка. Швидкість обертання барабана 15–17 хв$^{-1}$.

Комфортність шкіряного матеріалу, одержаного за різними технологіями дублення, визначалась за комплексом фізико-механічних, теплофізичних і гігієнічних властивостей після кондиціювання зразків з дотриманням стандарту [13]. Пружно-пластичні та деформаційні властивості шкір визначались на розривній машині РТ-250М при швидкості деформування 90 мм·хв$^{-1}$ за методикою [11]. При цьому оцінювали міцність і деформацію зразків при навантаженні 9,8 МПа та розриванні, відповідно $\sigma_р$, МПа, $\varepsilon_{9,8}$ і $\varepsilon_р$, %, а також залишкове видовження $\varepsilon_з$, %. Жорсткість шкір вимірювали на приладі ПЖУ-12М за показником D, сН.

Для визначення теплофізичних властивостей матеріалу використовували прилад Alambeta фірми SENSORA (Чехія) [14] . Для цього вимірювали тепловий опір R, м$^2$·К·Вт$^{-1}$ і коефіцієнти теплопровідності λ, Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$ та теплового поглинання b, Вт·м$^{-2}$·с$^{1/2}$·К$^{-1}$. Паропроникність зразків $V_р$, мг·см$^{-2}$год, визначали за стандартом [15], пористість Р, %, і уявну питому масу $d_у$, г·см$^{-3}$ за методиками [11].

Для оцінки функціональних властивостей шкіряних матеріалів, одержаних за різними технологіями дублення, проведено комплекс фізико-хімічних досліджень. Результати досліджень зразків шкір наведені в табл. 4. Для оцінювання рівномірності фізико-механічних показників використовували коефіцієнти рівномірності $К_\sigma$ і $К_\varepsilon$ показників $\sigma_р$, і $\varepsilon_р$, які відповідали співвідношенню їх значень. Шкіри всіх методів дублення відзначаються рівномірністю значень показників міцності вздовж і перпендикулярно лінії хребта.

Це може свідчити про високий ступінь орієнтації елементів структури матеріалу під час післядубильного оброблення. За міцністю шкіри діальдегідного дублення відзначаються максимальним значенням, в той час як матеріал рослинного дублення має мінімальні значення розривного видовження і деформації при напруженні 9,8 МПа. При цьому за показником жорсткості максимальні значення досягаються зразками шкіри рослинного дублення. Слід відзначити, що шкіри хромового методу дублення характеризуються досить високим показником міцності і мінімальним значенням жорсткості. Шкіри синтетичного дублення мають мінімальне видовження при напруженні 9,8 МПа при практично однаковій міцності зі шкурами хромового методу дублення.

Таблиця 4

**Фізико-механічні властивості шкіри з сировини шкур свиней**

| Варіант дублення | Напрям | Міцність, $\sigma_p$, МПа | Коефіцієнт рівномірності за показником $\sigma_p$, $K_\sigma$ | Відносне видовження, % | | Коефіцієнт рівномірності за показником $\varepsilon_p$,$K_\varepsilon$ | Жорсткість D, сН |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $\varepsilon_{9,8}$ | $\varepsilon_p$ | | |
| Д1 | В | 21 | 0,92 | 38 | 56 | 1,00 | 25,0 |
| | П | 23 | | 40 | 56 | | 25,0 |
| Д2 | В | 22 | 0,92 | 36 | 59 | 0,97 | 37,0 |
| | П | 24 | | 39 | 61 | | 33,0 |
| Д3 | В | 18 | 0,90 | 33 | 46 | 0,98 | 39,0 |
| | П | 20 | | 36 | 47 | | 41,0 |
| Д4 | В | 23 | 0,92 | 39 | 71 | 0,92 | 34,3 |
| | П | 25 | | 40 | 65 | | 36,1 |

Примітка. В і П відповідають зразкам відібраним вздовж і перпендикулярно лінії хребта шкіри.

Для оцінки гігієнічних і теплофізичних властивостей шкір різних методів дублення суттєве значення мають показники щільності та пористості структури зразків визначених в різних топографічних ділянках (рис. 1). Слід відзначити, що характер формування шкіри зумовлений не тільки особливостями їх структури до процесу дублення, але й її змінами в процесах дублення і додублювання, пов'язаних з розміром молекул та агрегатів дубильних речовин.

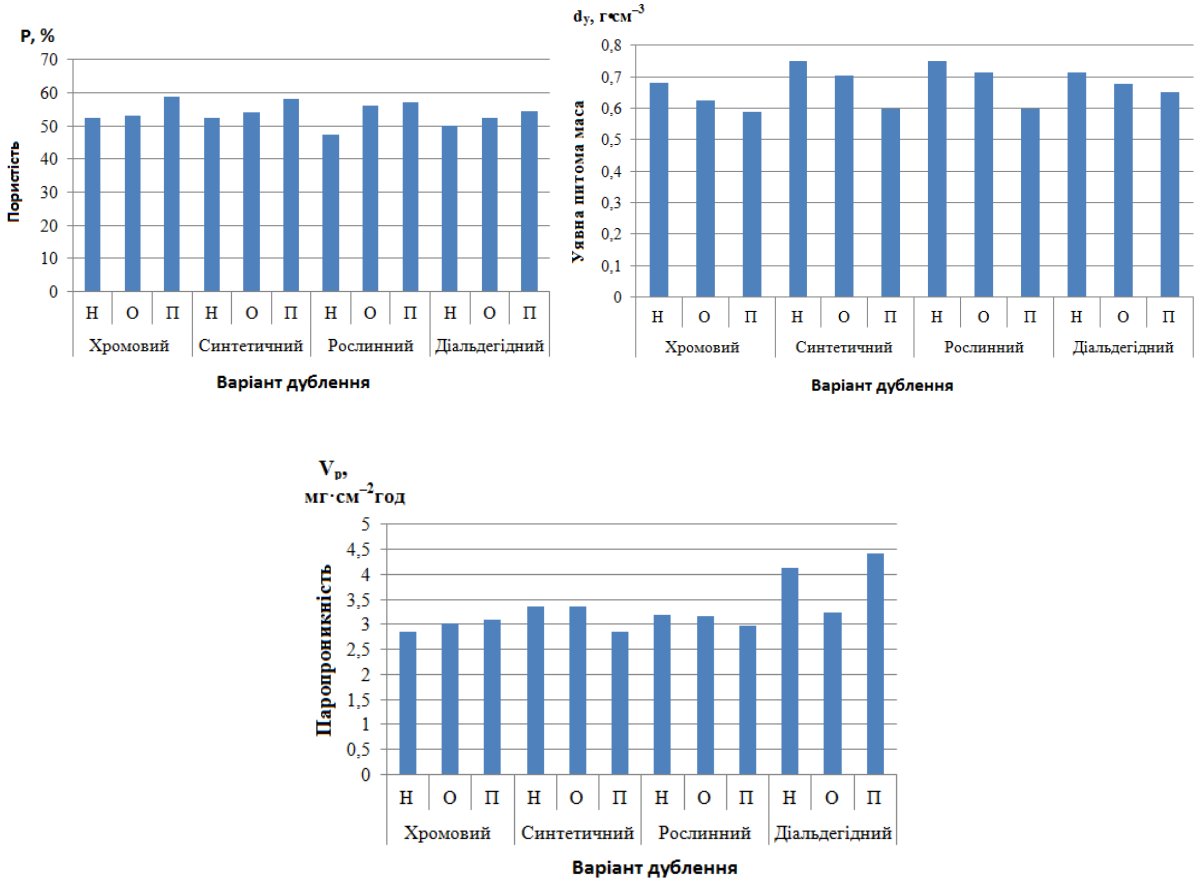



**Рис. 1. Гігієнічні властивості шкіри з сировини шкур свиней**

Як свідчать отримані дані, спостерігається кореляція між значеннями уявної питомої маси і пористості шкір різних методів дублення. Максимальна уявна питома маса і мінімальна пористість

досягається шкірами рослинного дублення в точці Н, а мінімальна уявна питома маса і максимальна пористість в цій точці спостерігається в шкірах хромового і синтетичного методів дублення. Дещо нижчу уявну питому масу і вищу пористість мають зразки отримані в точці О, за винятком зразків рослинного методу дублення, в якій значення цих показників наближається до точки П з найнижчими показниками щільності та найвищими значеннями пористості.

Максимальне значення уявної питомої маси зразків рослинного методу дублення в точці Н зумовлено розмірами частинок танідів рослинного дубителя, які відкладаються, в основному, у крупних порах і тому при видаленні вологи ущільнюються мікрофібрилярні проміжки. Разом з тим необхідно зазначити, що щільність структури зменшується від точки Н до точки П зі зменшенням кута нахилу пучків колагенових волокон. При цьому на відміну від танідів, діальдегіди і хромові дубителі досягають мікрофібрилярного рівня [16], утворюючи просторову структуру. Отже, найбільш однорідна структура шкіряного матеріалу за топографічними ділянками формується при використанні діальдегідного дубителя.

Щодо паропроникності, то максимальні значення цього показника мають шкіри діальдегідного методу дублення, а мінімальні – хромового дублення у точці Н. Відсутність кореляції між паропроникністю і пористістю зразків зумовлена механізмом паропроникності, пов'язаним не тільки з об'ємом пор, але й гідрофільністю поверхні отриманої структури зразка та їх різним вкладом в адсорбцію-десорбцію при транспортуванні води через зразок. Слід відзначити, що за показником паропроникності зразки шкір синтетичного і рослинного методів дублення займають проміжне положення. Паропроникність зразків шкір синтетичного і рослинного методів дублення характеризується практично однаковими значеннями цього показника. Максимальне значення має показник паропроникності шкір діальдегідного методу дублення у точці П.

Отже, паропроникність досліджуваних готових шкір різних методів дублення змінюється в інтервалі 2,85–4,4 мг·см$^{-2}$год. При цьому слід враховувати, що в процесі додублювання шкіри підлягали додатковому формуванню структури за методикою, наведеною в табл. 3.

Результати дослідження теплофізичних властивостей шкір різних методів дублення та в різних топографічних ділянках представлені на рис. 2.

Таким чином, за комплексом фізико-механічних, теплофізичних і гігієнічних властивостей шкіри альдегідного дублення характеризуються комплексом оптимальних властивостей і можуть бути рекомендовані при виготовленні виробів спеціального призначення.

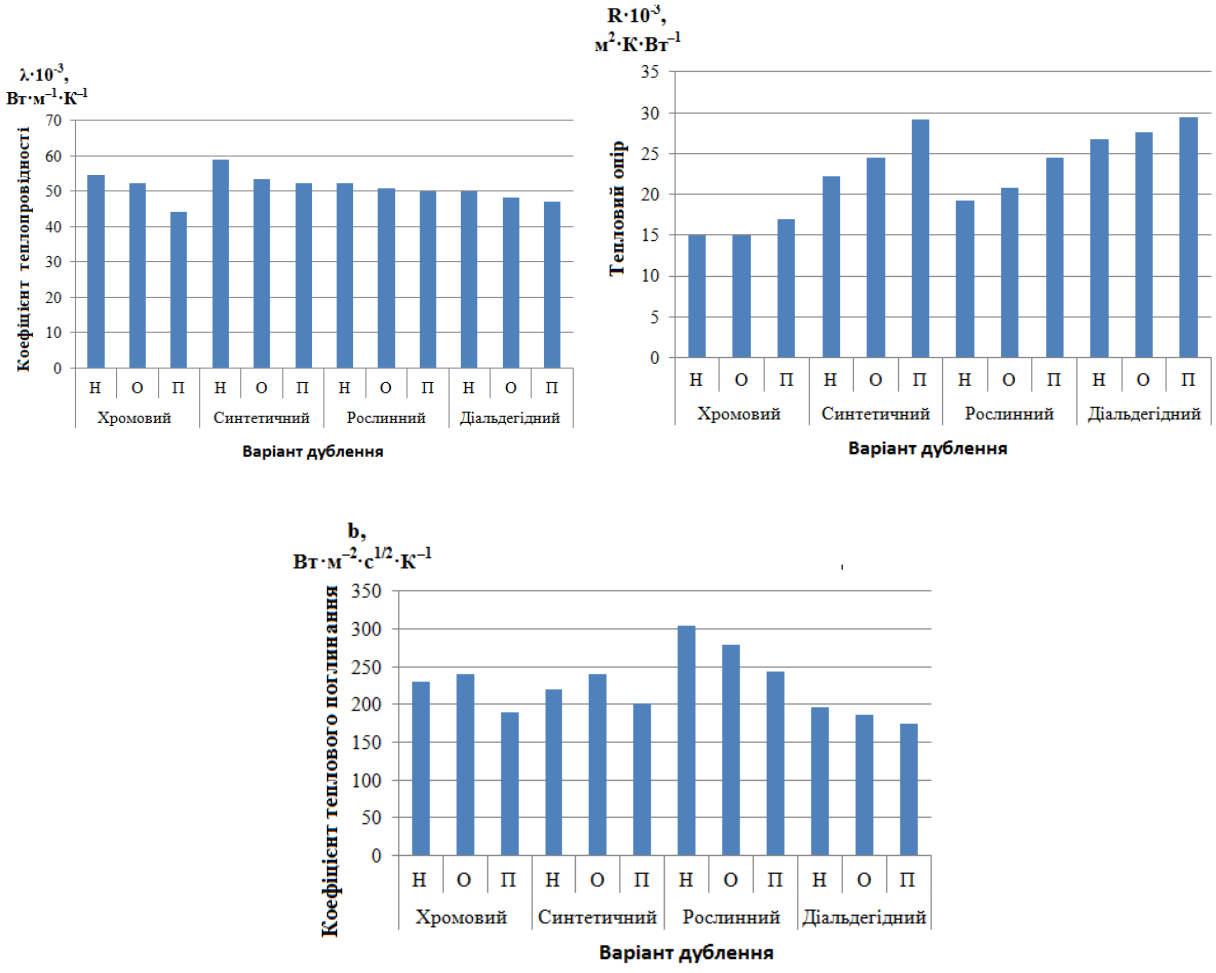



**Рис. 2. Теплофізичні властивості шкіри з сировини шкур свиней**

**Висновки**

Досліджено вплив методів дублення на фізико-механічні, теплофізичні та гігієнічні властивості шкір із сировини шкур свиней. Встановлено, що шкіри діальдегідного методу дублення з наступним наповнюванням полімером аніонного типу забезпечує формування однорідної пористої структури шкіряного матеріалу в різних топографічних ділянках з необхідним комплексом функціонально-експлуатаційних властивостей.

Найбільш поширена технологія хромового методу дублення голини використана при виготовленні еластичних шкір з сировини шкур свиней забезпечує формування натурального матеріалу з задовільними теплофізичними та фізико-механічними властивостями.

Шкіри, отримані з сировини шкур свиней з використанням різних дублюючих агентів можуть бути рекомендовані для виготовлення виробів широкого асортименту. У тому числі діальдегідного методу дублення оптимальніше використовувати для виробів осінньо-зимових, а хромового методу дублення – для виробів весняно-літніх.

**Література**

1. Грищенко І.М. Ринок хутряних товарів України : монографія / І.М. Грищенко, А.Г. Данилкович, І.Т. Зварич, С.С. Гаркавенко, О.Р. Мокроусова, Н.А. Крахмальова ; за заг.ред. І.М. Грищенка. – К. : Світ успіху, 2016. – 256 с.

2. Засуха Ю.В. Технологія виробництва продукції свинарства : підручник / Ю.В. Засуха, В.М. Нагаєвич, М.П. Хоменко, Д.І. Барановський, В.І. Герасимов, В.Г. Пелих, М.Г. Повод, В.І. Радченко, В.І. Сокрут, Є.Ф. Томін – Вінниця : Нова книга, 2009. – 336 с.

3. Андреєва О.А. Товарознавство шкіряно-хутрової сировини : навчальний посібник / Андреєва О.А., Цеменко Г.В. – К. : Кондор, 2012. – 355 с.

4. Грищенко И.М. Экономико-экологические аспекты развития современного кожевенного производства / И.М. Грищенко, А.Г. Данилкович, Е.А. Волошенко // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. – 2013. – № 3. – С. 78–82.

5. Bitlisli B.O., Karavana H.A., Basaran B., Aslan A. Importance of using genuine leather in shoe production in terms of foot comfort // Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists 89– 2005. – P. 107-110.

Orc N., Ozgunay H., Mutlu M.M., Ondogan Z. Comparative determination of physical and fastness properties of garment leathers tanned with various tanning materials for leather skirt // Tekstil ve Konfeksiyon 24– 2014. – P. 413–418.

6. Orc N., Mutlu M.M., Yildiz E. Z., Pamuk O. Sewability properties of garment leathers tanned with various tanning materials // Annals of the University of Oradea: Fascicle of Textiles, Leatherwork. – 2016. – P. 197–202

7. Phebe K., Thanikaivelan P., Krishnaraj K., Chandrasekaran B. Factors influencing the seam efficiency of goat nappa leathers // JALCA 107 – 2012, P. 78–84.

8. Colak S.M., Ozdil N., Ekinci M., Kaplan O. Thermophysiological comfort properties of the leathers processed with different tanning agents // Tekstil ve Konfeksiyon 26 – 2016. – P. 436–443.

9. Данилкович А.Г. Технологія і матеріали виробництва шкіри: Навчальний посібник / Данилкович А.Г., Мокроусова О.Р., Охмат О.А. – К., 2009. – С. 455–476.

10. Данилкович А. Г. Аналитический контроль в производстве кожи и меха: лабораторный практикум / Данилкович А. Г., Чурсин В.И. – М., 2016. – 176 с.

11. ДСТУ 2726–94. Шкіра для верху взуття. Технічні умови, 1994.

12. EN ISO 2419, 2006, Leather - Physical and mechanical tests - Sample preparation and conditioning, 2006.

13. Первая Н.В. Аналіз методів та приладів для визначення теплофізичних властивостей матеріалів для взуття / Н.В. Первая // Вісник КНУТД. – 2017. – № 6 (114). – С. 96–106.

14. EN ISO 14268, 2004, Leather - Physical and mechanical tests - Determination of water vapor permeability, 2004.

15. Danylkovych A., Lishchul V., Zhygotsky A., Danylkovych A. Structural transformation of collagen containing raw materials under alkaline treatment // Chemistry and Chemical Technology. Vol. 10,1 – 2017. – P. 81–91.

**References**

1. Hryshchenko I.M. Rynok khutrianykh tovariv Ukrainy : monohrafiia / I.M. Hryshchenko, A.H. Danylkovych, I.T. Zvarych, S.S. Harkavenko, O.R. Mokrousova, N.A. Krakhmalova ; za zah.red. I.M. Hryshchenka. – K. : Svit uspikhu, 2016. – 256 s.

2. Zasukha Yu.V. Tekhnolohiia vyrobnytstva produktsii svynarstva : pidruchnyk / Yu.V. Zasukha, V.M. Nahaievych, M.P. Khomenko, D.I. Baranovskyi, V.I. Herasymov, V.H. Pelykh, M.H. Povod, V.I. Radchenko, V.I. Sokrut, Ye.F. Tomin – Vinnytsia : Nova knyha, 2009. – 336 s.

3. Andreieva O.A. Tovaroznavstvo shkiriano-khutrovoi syrovyny : navchalnyi posibnyk / Andreieva O.A., Tsemenko H.V. – K. : Kondor, 2012. – 355 s.

4. Grishenko I.M. Ekonomiko-ekologicheskie aspekty razvitiya sovremennogo kozhevennogo proizvodstva / I.M. Grishenko, A.G. Danilkovich, E.A. Voloshenko // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologiya lyogkoj promyshlennosti. – 2013. – № 3. – S. 78–82.

5. Bitlisli B.O., Karavana H.A., Basaran B., Aslan A. Importance of using genuine leather in shoe production in terms of foot comfort // Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists 89– 2005. – P. 107-110.

6. Ors N., Ozgunay N., Mutlu M.M., Ondogan Z. Comparative determination of physical and fastness properties of garment leathers tanned with various tanning materials for leather skirt // Tekstil ve Konfeksiyon 24– 2014. – R. 413–418.

7. Ors N., Mutlu M.M., Yildiz E. Z., Pamuk O. Sewability properties of garment leathers tanned with various tanning materials // Annals of the University of Oradea: Fascicle of Textiles, Leatherwork. – 2016. – R. 197–202

8. Phebe K., Thanikaivelan P., Krishnaraj K., Chandrasekaran B. Factors influencing the seam efficiency of goat nappa leathers // JALCA 107 – 2012, R. 78–84.

9. Colak S.M., Ozdil N., Ekinci M., Kaplan O. Thermophysiological comfort properties of the leathers processed with different tanning agents // Tekstil ve Konfeksiyon 26 – 2016. – R. 436–443.

10. Danylkovych A.H. Tekhnolohiia i materialy vyrobnytstva shkiry: Navchalnyi posibnyk / Danylkovych A.H., Mokrousova O.R., Okhmat O.A. – K., 2009. – S. 455–476.

11. Danilkovich A. G. Analiticheskij kontrol v proizvodstve kozhi i meha: laboratornyj praktikum / Danilkovich A. G., Chursin V.I. – M., 2016. – 176 s.

12. DSTU 2726–94. Shkira dlia verkhu vzuttia. Tekhnichni umovy, 1994.

13. EN ISO 2419, 2006, Leather - Physical and mechanical tests - Sample preparation and conditioning, 2006.

14. Pervaia N.V. Analiz metodiv ta pryladiv dlia vyznachennia teplofizychnykh vlastyvostei materialiv dlia vzuttia / N.V. Pervaia // Visnyk KNUTD. – 2017. – № 6 (114). – S. 96–106.

15. EN ISO 14268, 2004, Leather - Physical and mechanical tests - Determination of water vapor permeability, 2004.

16. Danylkovych A., Lishchul V., Zhygotsky A., Danylkovych A. Structural transformation of collagen containing raw materials under alkaline treatment // Chemistry and Chemical Technology. Vol. 10,1 – 2017. – R. 81–91.

Рецензія/Peer review : 14.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ліщук В.І.

**РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ**

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-62-67
УДК 004.932.7

Ю.П. КЛЬОЦ, К.Ю. СТЕФАНОВИЧ, Є.С. ШАХОВАЛ, В.І. ДЕМЕШКО
Хмельницький національний університет

# ДИНАМІЧНЕ БАЛАНСУВАННЯ ТРАФІКУ МІЖ ДЕКІЛЬКОМА ПРОВАЙДЕРАМИ

*В роботі проводиться аналіз методів балансування трафіку між декількома провайдерами. Досліджується проблема навантаження на мережу та її вирішення шляхом балансування трафіку. Розкриваються та досліджуються методи, алгоритми та моделі балансування трафіку між декількома провайдерами. Описано метод та функції балансування трафіку.*

*Ключові слова: балансування мережі, розподіл трафіку, метод, алгоритм, провайдер, інтернет, мережа, процесор, навантаження, мережі.*

Y.P. KLOTS, K.Y. STEFANOVYTCH, Y.S. SHAKHOVAL, V.I. DEMESHKO
Khmelnytskyi National University

**DYNAMIC TRAFFIC BALANCE BETWEEN SEVERAL PROVIDERS**

*In the work, the research and disclosure of the concept of balancing traffic between several providers. The problem of the load on the network and its solution by balancing the traffic is studied. Methods, algorithms and models for balancing traffic between several providers are revealed and explored. Describes the functions and capabilities of each algorithm and network allocation method. Balancing Internet traffic Optimizes network performance. The paper analyses the main load balancing algorithms for different performance indicators where each algorithm has it's own parameter. It's also mentioned the main features and scope of each algorithm and determined the advantages and disadvantages of each algorithm. There is also described the method and functions of balancing on the basis of StoneSoft and Barracuda Networks products with their pros and cons. StoneSoft's solutions have a greater emphasis on security and business continuity, while Barracuda is a good solution for medium-sized organizations. The article describes the mathematical model of the load balancing system where the balancing machine uses a mass maintenance system.*

*Keywords: network balancing, traffic distribution, method, algorithm, provider, internet, network, processor, load, network.*

## Вступ

Балансування навантаження – одна з основних концепцій, необхідних для побудови надійних розподілених систем.

У комп'ютерних системах балансування навантаження розподіляє навантаження між декількома обчислювальними ресурсами, такими як комп'ютери, комп'ютерні кластери, мережі, центральні процесори або диски. Мета балансування навантаження – оптимізація використання ресурсів, максимізація пропускної здатності, зменшення часу відгуку і запобігання перевантаження будь-якого одного ресурсу.

У термінології комп'ютерних мереж балансування навантаження або вирівнювання навантаження чи розподілення навантаження – це метод розподілу завдань між декількома мережевими пристроями, наприклад, це можуть бути сервери, з метою оптимізації використання ресурсів, скорочення часу обслуговування запитів, горизонтального масштабування кластера, мається на увазі динамічне додавання або видалення пристроїв, а також забезпечення відмовостійкості, тобто резервування.

Основна мета балансування навантаження – це оптимізація використання ресурсів, максимізація пропускної здатності, зменшення часу відгуку і запобігання перевантаження будь-якого одного ресурсу. Використання декількох компонентів балансування навантаження, замість одного компонента, може значно підвищити надійність і доступність за рахунок резервування. Саме балансування навантаження передбачає, зазвичай, наявність спеціального програмного забезпечення або апаратних засобів, таких як багаторівневий комутатор або система доменних імен, таких як серверний процес.

Різниця між балансуванням навантаження і фізичного з'єднання в тому, що балансування навантаження ділить трафік між мережевими інтерфейсами на мережевий сонет основі, в той час як з'єднання каналу передбачає поділ трафіку між фізичними інтерфейсами на більш низькому рівні, і робить це або в пакет, або за допомогою з'єднання.

## Підходи та алгоритми балансування мережі

Процедура балансування здійснюється за допомогою цілого комплексу алгоритмів і методів, відповідним такими рівнями моделі OSI:

мережевому;

транспортному;

прикладному.

Динамічний підхід балансування навантаження підрозділяється на два типи:

розподілений;

нерозподілений або централізований.

Вони визначається наступним чином: В нерозподіленому підході один вузол або група вузлів

відповідають за управління та розподіл по всій системі. Інші вузли не розподіляють завдання і не виконують керуючі функції, отже цей тип алгоритмів не є відмовостійким, може статися перевантаження центрального вузла прийняття рішень. Такий підхід є корисним в невеликих мережах з низьким рівнем навантаженням. В розподіленому підході кожен вузол незалежно будує свій вектор навантаження. Всі вузли в мережі відповідають за розподіл навантаження і наповнення власної локальної бази даних для прийняття ефективних рішень балансування. Це призводить до великих комунікаційних витрат і складності алгоритмів. Такі алгоритми є корисними у великих і гетерогенних мережах.

При розподіленому підході балансування навантаження може мати дві форми: кооперативну і некооперативну. У кооперативної вузли працюють спільно для досягнення спільної мети, наприклад, поліпшення загального часу відгуку. При некооперативному підході балансування вузол працює незалежно від мети, наприклад, поліпшення часу виконання завдання. Вузли постійно взаємодіють один з одним і при розподіленому підході генерують більше повідомлень, ніж при нерозподіленому. Передача повідомлень між вузлами для обміну інформацією про оновлення системи може привести до зниження продуктивності системи. Один вузол або група вузлів вирішує завдання балансування навантаження при нерозподіленому підході, він може приймати дві форми: централізовану та напіврозподілену [1].

У централізованих алгоритмах один вузол одноосібно відповідає за балансування навантаження всієї системи і називається центральним вузлом. Використовується в невеликих мережах. У напіврозподілених алгоритмах кластер формується групою вузлів системи, балансування навантаження відбувається в кожному кластері централізованого типу. Серед вузлів в кластері центральний вузол ініціює балансування навантаження в цій групі. Напіврозподілені алгоритми обмінюються більшою кількістю повідомлень в порівнянні з централізованими. Зазвичай динамічний алгоритм балансування містить чотири елементи: політику балансування (transfer policy); алгоритм вибору партнера (location policy); алгоритм вибору завдання для передачі (selection policy); механізм збору необхідної інформації про стан системи (information policy).

Політика балансування визначає, чи є вузол об'єктом балансування. Різні види політик балансування використовують порогові значення завантаженості вузлів, відхилення величини навантаження вузла від середнього значення по системі та інші методи. Алгоритм вибору завдання визначає, яке завдання необхідно передати. При виборі завдання для відправки алгоритм може враховувати, що накладні витрати, пов'язані з пересилкою завдання, повинні бути мінімальні, складність виконання завдання повинна бути великою, число зв'язків в завданні з локальними ресурсами повинно бути мінімальним. Алгоритм вибору партнера відповідає за вибір відповідного вузла для операції балансування. Поширеною технікою в розподілених алгоритмах є опитування (polling) вузлів. Опитування може бути послідовним або паралельним, використовувати результати попередніх опитувань. У централізованих алгоритмах вузол звертається до спеціалізованого координатору для визначення відповідного партнера для балансування. Координатор збирає і підтримує в актуальному стані інформацію про завантаженість вузлів системи, а алгоритм пошуку партнера використовує ці дані.

Механізм збору інформації про завантаженість системи визначає джерело інформації, час збору даних про завантаженість, місце зберігання інформації. Існує кілька класів механізмів збору інформації.

1. Збір даних по необхідності. В даному класі використовуються розподілені алгоритми, які збирають інформацію про завантаженість, коли вузол потребує балансування навантаження.
2. Періодичний збір даних. Алгоритми даного класу можуть бути як централізованими, так і розподіленими. Залежно від зібраних даних, алгоритм ініціює балансування навантаження.
3. Збір даних щодо зміни стану.

У системах, що реалізують алгоритми даного класу, вузли самі поширюють інформацію про зміну завантаженості при зміні внутрішнього стану. У разі розподілених алгоритмів дані направляються сусіднім вузлам, в разі централізованих алгоритмів дані направляються координатору.

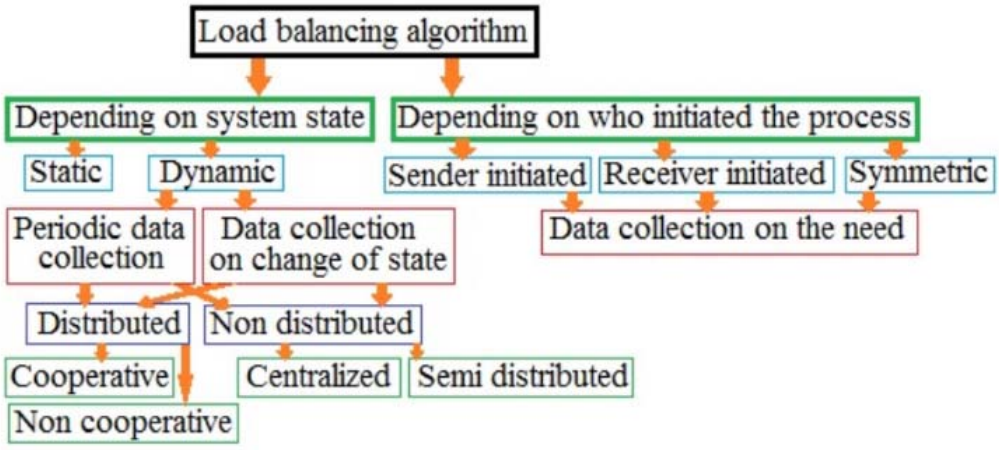



**Рис. 1. Класифікація алгоритмів балансування**

Завдяки алгоритмам балансування досягається більш висока пропускна здатність і поліпшується час відгуку в розподілених системах. Однак кожен з алгоритмів має як переваги, так і недоліки [2].

**Система балансування**

Представлена система балансування навантаження складається з групи серверів і балансувальника навантаження. Ця система балансування навантаження побудована на основі підсистеми балансування навантаження і підсистеми управління і моніторингу, які тісно взаємодіють один з одним: підсистема балансування навантаження: алгоритм балансування навантаження, інформація про поточний стан системи, гнучкі настройки QoS, динамічний розподіл трафіку по різних каналах зв'язку і вузлів залежно від їх поточного стану, ступеня завантаження, адміністративних політик балансування навантаження. Підсистема управління та моніторингу: збір та аналіз статистики про поточний стан системи, визначення мультифрактальних властивостей вхідного потоку даних, розрахунок розподілу потоків по вузлах мережі з урахуванням класифікації трафіку і завантаженості серверів і каналів зв'язку.

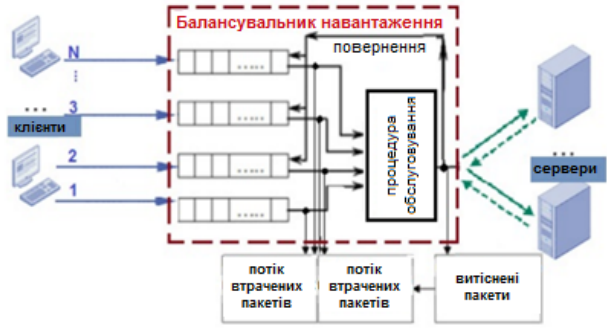



**Рис. 2. Система балансування навантаження**

В кожен момент $t \in T$ на розподільник *LB* надходить трафік інтенсивністю $\lambda=[\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_N]$, який відноситься до *q – го* класу обслуговування, який необхідно доставити на *SERVERk* для обробки, не перевищуючи максимально допустимих значень затримки $\tau q$ та максимально допустимого значення втрат *lq* залежно від поточного завантаження системи і реальної пропускної можливості в даний момент часу.

Трафік має множину характеристик $V=\{\lambda h,\mu\}$, де $\lambda=[\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_N]$ – потоки заявок або пакетів, різноманітної інтенсивності $h=[H,h(q),\Delta h]$, де *h(q)* – вибіркові значення функції загального значення Херста, *H=h(2)* – значення параметра Херста, $\Delta h = h(q_{\min}) - h(q_{\max})$ – діапазон загального значення Херста для відрізка трафіку, $\mu$ – складність запиту. Складність запиту визначається як вектор необхідних ресурсів $\mu=(CPU, Net, RAM)$ для виконання запиту. Кожному *q*-му класу обслуговування відповідає набір векторів необхідних ресурсів $\mu_r=(CPU, Net, RAM), r=1,2,...$

Балансувальник навантаження і сервера з'єднані між собою двосторонніми мережевими зв'язками з максимальною пропускною здатністю $Link_i=\{L_i\}$, $i=1,2,..,N$, які мають доступну пропускну здатність $Net_i(t)=\{Net_i\}$ в момент часу *t.* Кожний сервер $Serv_k, k=1,2,...$ характеризується параметрами:

$CPU_i(t)$ – обсяг вільного ЦПУ *i-го* сервеу в момент часу *t*, який обчислюється як:

$$CPU_i(t)=1-\sum_1^J Load_M \Big/ j ,$$

де $Load_M$ – завантаженість кожного ядра $j = \{1,2...\}$ – в кожному процесорі $M = \{1,2...\}$ в сервері в момент часу *t* . $RAM_k(t)$ – обсяг вільної оперативної пам'яті *i*-го сервера в момент часу *t.*

На вхід балансувальника завантаження *LB* надходять кілька незалежних потоків пакетів з різною інтенсивністю $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ кожен з яких відправляється в чергу *Q* обмеженої ємності. Час обслуговування заявок залежить від класу обслуговування *q*, тобто враховується пріоритетність заявок, найвищий пріоритет буде завжди першим. Поки всі пріоритетні запити на обслуговування не будуть оброблені, пакети інших типів залишаються в черзі до закінчення їх часу існування. Знову надійшовші пріоритетні запити переривають обробку непріоритетних і з ймовірністю дорівнює одиниці, витісняють їх в накопичувач, якщо є вільні місця очікування, або за межі системи, якщо вільних місць немає. Витісненні з обслуговування пакети приєднуються до черги непріоритетних вимог і можуть бути дообробленні після всіх пріоритетних. Накопичувачі є роздільними для кожного вхідного потоку, вільні місця очікування цілком доступні для будь-якого запиту, який надійшов знову.

На відміну від типових пріоритетних *СМО* розглянута система забезпечена імовірним виштовхуючим механізмом. Пріоритетний пакет, що застав всі місця очікування зайнятими в момент обробки іншого пріоритетного пакета, із заданою вірогідністю витісняє з накопичувача один з менш пріоритетних пакетів і займає його місце. Витіснений пакет втрачається або відправляється назад в чергу. Підсистема балансування завантаження *LB*, відповідно до закладеного в неї алгоритму, здійснює вилучення завдань з черг *Q* і призначає їх на вільні обчислювальні ядра відповідних серверів.

Для опису механізму вивільнення зайнятих трафіком мережевих ресурсів при закінченні передачі трафіку *q*-го класу обслуговування, це відбувається на основі даних, що надходять від протоколу маршрутизації, що підтримує повідомлення про доступну смугу пропускання і доступних ресурсах на сервері, наприклад, CSPF, SNMP, введемо змінну $LB\ \varepsilon_{\zeta}^{q,i}(t)=\{0,1\}$ вказує, що в момент *t* на сервер перестав надходити трафік класу $q(\varepsilon=1)$ який був прийнятий на обслуговування в момент *t*0 і повинен був передаватися по шляху $Net_i(t)$ на сервер $Serv_k$. Дана змінна містить всі необхідні дані для визначення мережевих ресурсів, що підлягають вивільненню. Балансувальник LB в *t*-й момент характеризується коефіцієнтом втрат $X_{LB}^q(t)\in X$ середнім часом очікування пакета в черзі $T_{LB}^q(t)\in T$.

Моніторинг стану серверів і вільної пропускної здатності можна здійснити трьома способами:

після кожного запиту, що надійшов;

в фіксовані проміжки часу, які визначаються статичним алгоритмом;

в нефіксовані проміжки часу, які визначаються динамічним алгоритмом.

Інформація, отримана першим способом, є найбільшою за обсягом, тому що вимірювання проводяться після кожного запиту, що надійшов. При другому способі кількість інформації постійна, але необхідно визначити інтервал знімання інформації, щоб обсяг інформації не був надмірним або недостатнім. При третьому способі кількість інформації залежить від частоти інтервалів контролю, який повинен пристосовуватися до структури вхідного трафіку, з огляду на його самоподібну структуру [3].

**Балансування системи**

Систему балансування навантаження пропонується будувати на основі наступних підсистем:

1. Підсистема балансування навантаження;
2. Підсистема централізованого управління та моніторингу.

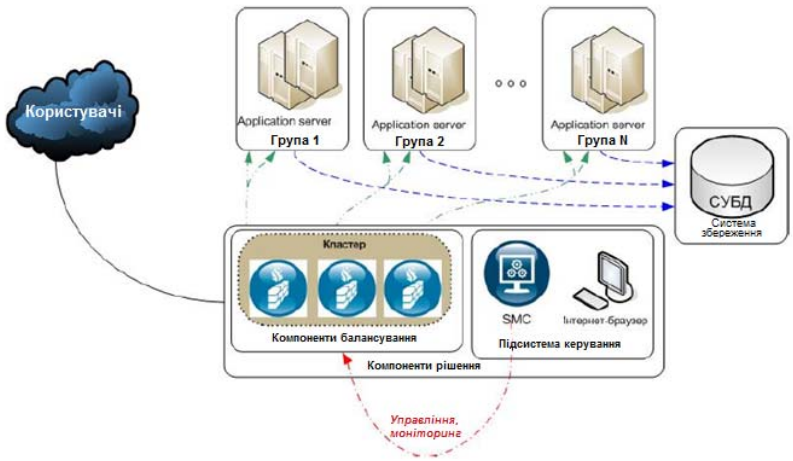



**Рис. 3. Система балансування на основі продукту StoneSoft**

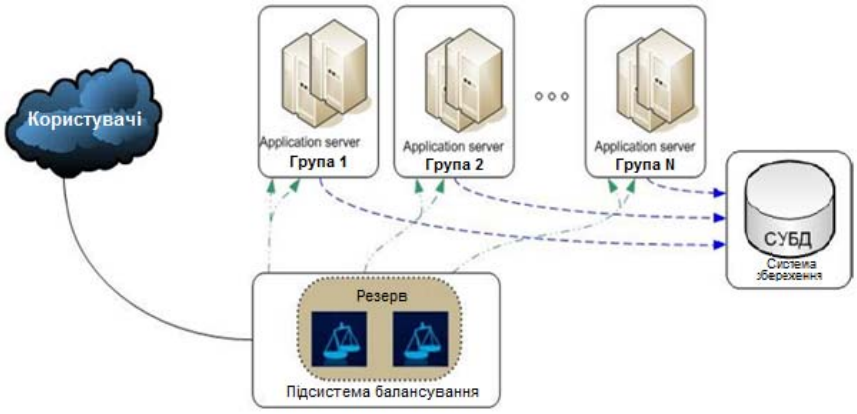



**Рис. 4. Схема балансування на основі продукту Barracuda Networks**

Рішення з балансування навантаження включає в себе сукупність зазначених підсистем, тісно взаємодіючих одна між одною для забезпечення відповідності заявленому функціоналу.

Рішення побудоване на основі використання продукту компанії StoneSoft вигідно виділяються на тлі конкурентів, оскільки розроблялися з урахуванням потреб великих організацій, для яких безпека бізнес-процесів, в тому числі завдання безперервності бізнесу знаходяться на першому плані. Стандартні апаратні платформи можуть підтримувати швидкості більше 10 Гб/с на пристрій, а з урахуванням можливостей кластеризації ці величини зростають більше 100 ГБ/с на кластер. Характерною особливістю є те, що система балансування навантаження тісно інтегрована з фаєрволом і поставляється як комбіноване рішення і робить дану пропозицію оптимальною по співвідношенню ціна / якість і мінімальною з точки зору загальної вартості користування. StoneGate підтримує ряд технологій, що дозволяють реалізувати механізми балансування навантаження пулів серверів шляхом застосування запатентованої технології MultiLink [4].

MultiLink дозволяє без застосування складних протоколів динамічної маршрутизації реалізувати динамічне балансування трафіку за каналами зв'язку залежно від їх завантаження і реальної пропускної здатності в конкретний момент часу, динамічне балансування навантаження по пулу ресурсів (серверів) залежно від їх поточного завантаження, відстежувати стан серверів, коефіцієнт використання процесора, пам'яті, диска і приймати рішення на підставі цієї інформації.

Алгоритм роботи полягає в підтримці однакового середнього значення числа відкритих з'єднань на всіх серверах з урахуванням необхідності коректної «прив'язки» вже відкритих з'єднань до вибраного серверного ресурсу. При цьому можливо зробити інтеграцію з DNS-серверами і відправляти їм DDNS-поновлення при виході, наприклад, з ладу одного з каналів зв'язку, ефективно перенаправляючи

користувачів на інший канал / ресурс / сервер. Для моніторингу стану сервісів можливо використовувати програмні агенти, що працюють на вузлі локально і надають на підставі зібраних даних балансувальнику інформацію про те, наскільки завантажений сервер [5].

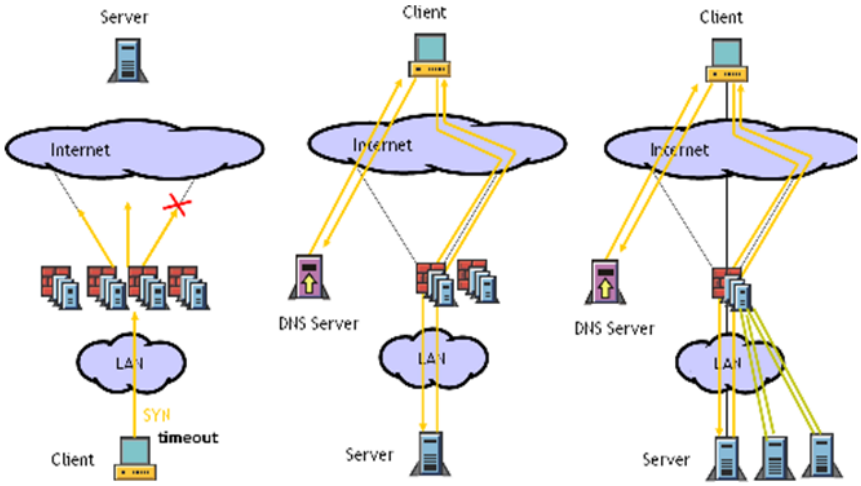



**Рис. 5. Балансування навантаження за каналами та ресурсами**

Підсистема балансування навантаження на базі рішень компанії Barracuda Networks будується на базі пари пристроїв Load Balancer 340, розраховані на швидкості до 1 Гб/с і обслуговування до 35 серверів. Використання пари пристроїв дозволяє забезпечити резервування системи на випадок виходу з ладу основного пристрою. За нормальних умов другий балансувальник лише синхронізує стан сесій і включається в роботу при виході з ладу основного, коли втрачається канал синхронізації. Час перемикання з основного на резервний становить від 5 до 30 секунд залежно від моделі впровадження. Load Balancer підтримує 3 методи установки: Route-path; Bridge-path; Direct server return.

Найпоширенішим є перший варіант – route-path. В цьому випадку сервери виділяються в окрему підмережу, а пристрої балансування розподіляють трафік, що приходить на віртуальний адреси, які маршрутизуються на зовнішні інтерфейси, що розташовуються в окремому мережевому сегменті. Обмеженням в цьому випадку є необхідність безпосереднього підключення серверів до сегменту, доступному через LAN- інтерфейси Barracuda Networks. При методі впровадження Bridge-path, або Direct Server Return збільшується час перемикання на резервний пристрій (до 30 секунд), а також виникають додаткові вимоги до конфігурації мережевого і серверного устаткування. Bridge-path режим передбачає фізичний поділ сегмента мережі, де розташовуються сервери, на дві частини, що вимагає залучення додаткового мережевого обладнання. У режимі Direct Server Return сервери і балансувальник також знаходяться в одному логічному мережевому сегменті, однак фізичного поділу середовища можна уникнути. Особливістю цього впровадження є те, що запит на пул серверів проходить через балансувальник, проте у відповідь трафік вже йде, минаючи його, безпосередньо до клієнта, який ініціював сесію, що зменшує час відгуку і зменшує завантаження пристроїв балансування. Однак в цьому випадку неможливе використання cookie або трафіку SSL.

Залежно від ваги сервера, яка була йому присвоєна під час конфігурування сервісу, Barracuda може по-різному розподіляти навантаження. Алгоритм вибирається залежно від необхідного результату: в разі round- robin один і той же сервер може отримувати велику кількість тривалих відкритих з'єднань, що може привести до його перевантаження. У другому випадку система намагається рівномірно розподілити кількість відкритих з'єднань за серверами з урахуванням їх ваги [6,7].

Так, підсистема балансування навантаження на базі StoneSoft не лімітує кількість груп серверів і сервісів, для Barracuda це ліміт в 35 серверів, що недостатньо для великих розподілених проектів. Доступ до цих сервісів контролюється і розмежовується за рахунок тісної інтеграції підсистем міжмережевого екранування і балансування навантаження між собою у вирішенні StoneSoft, а в рішенні Barracuda блокуються окремі атаки за рахунок вбудованої підсистеми IPS.

При розподілі трафіку за ресурсами в пулі у StoneSoft можливо контролювати не просто працездатність мережевих інтерфейсів сервера, але і контролювати параметри самої ОС, аж до завантаження процесора, оперативної пам'яті, відгуків служб. У Barracuda стандартне опитування йде по ICMP, але можна також вказати на необхідність моніторингу шляхом ініціювання пробних TCP з'єднань, а також SNMP-опитування завантаження ЦП. У StoneSoft в разі необхідності можливо організувати пріоритезацію трафіку або управління смугою пропускання для різних сервісів або навіть категорій користувачів. У Barracuda для цього необхідно встановлювати зовнішній пристрій. Однак, якщо інфраструктура в частині мережевого обладнання вже розгорнута і працює, це не є критичним фактором [8].

Таблиця 1

**Порівняльна таблиця балансування та функцій на базі StoneSoft та Barracuda**

| Функції | StoneSoft | Barracuda |
|---|---|---|
| **Кластеризація** | Так, до 16 одночасно працюючих пристроїв | Ні, моментальне резервування з 2-х |
| **Балансування навантаження по серверам** | Так | Так |
| **Алгоритми балансування** | Round robin with session Persistence | Weighted round robin, Weighted Least connection |
| **Прив'язка сесій до серверу** | На рівні L4 | На рівні L4, HTTP cookie, Session Directory Integration |
| **Перевірка працеспроможності серверів** | ICMP або Агенти на серверах | ICMP, TCP з'єднання, завантаження ЦП |
| **Наявність резервного серверу** | Ні | Так |
| **Централізований моніторинг стану системи** | Так | Ні, тільки працюючого пристрою |
| **Обмеження доступу до серверів** | Так | Ні |
| **Вбудований механізм безпеки** | FW, IPS | IPS |

**Висновки**

В роботі проведено аналіз основних алгоритмів балансування навантаження за різними показниками продуктивності, для кожного алгоритму вказані параметри, що в ньому використовуються. Вказані основні особливості і сфера застосування кожного алгоритму, визначені переваги і недоліки кожного алгоритму. Представлено рекомендації вибору алгоритму балансування навантаження, виходячи із специфіки виконуваного завдання, проекту та мети. В роботі запропонована математична модель системи балансування навантаження, в якій балансувальник навантаження описується за допомогою системи масового обслуговування. Стан серверів описуються об'ємом вільного ЦПУ і обсягом вільної оперативної пам'яті. Всі значення параметрів моделі мають залежність від часу. Така модель дозволяє описувати поведінку розподіленої мережі в часі для різних класів обслуговування.

Описано метод та функції балансування на базі продуктів StoneSoft і Barracuda Networks, що мають свої переваги і недоліки. Рішення StoneSoft роблять більший акцент на безпеку і забезпечення безперервності бізнесу, тоді як Barracuda – це хороше рішення для середніх організацій.

**Література**

1. Кортунов В.І., Воробйов А.В. Вирішення задачі розподілення навантаження на основі динамічної моделі маршрутизатора // Проблеми телекомунікацій. 2015. 1 жовтня (№ 20). С. 4.

2. Емельянов А.О. Балансування навантаження: основні методи та алгоритми // IT-інфраструктура для бізнесу. 2017. 1 листоп. (№ 50). С. 15.

3. Камеда Ш., Поуртейлер О. Парадокси в розподілених рішеннях щодо оптимального балансування навантаження для мереж однорідних комп'ютерів. Журнал ACM (JACM), в. 49 н. 3, 2002.

4. Балансування навантаження. URL : https://habr.com/ru/post/192274/ (дата звернення : 14.03.2019).

5. Балансування навантаження за допомогою Round Robin DNS. URL : https://www.8host.com/blog/balansirovka-nagruzki-s-pomoshhyu-round-robin-dns/ (дата звернення : 15.03.2019).

6. Порівняльний аналіз методів балансування трафіку. URL : https://habr.com/ru/company/oleg-bunin/blog/319262/ (дата звернення : 18.03.2019).

7. Відео конференція Олега Буніна. URL : https://player.vimeo.com/video/151817241 (дата звернення : 18.03.2019).

8. Введення в сучасну мережу балансування навантаження і проксі. URL : https://medium.com/southbridge/introduction-to-modern-network-load-balancing-and-proxying-52e8ca36adde (дата звернення : 20.03.2019).

**References**

1. Kortunov V.I., Vorobyov A.V. Solving the load distribution task based on the dynamic router model. Problems of telecommunications. October 1, 2015. (№ 20). P. 4.

2. Emelyanov A.O. Load Balancing: Basic Methods and Algorithms. IT infrastructure for business. 2017. 1 November (№ 50) P. 15.

3. Kameda H., Pourtallier O. Paradoxes in distributed decisions on optimal load balancing for networks of homogeneous computers. Journal of the ACM (JACM), v. 49 n. 3, 2002.

4. Load balancing. URL: https://habr.com/en/post/192274/ (view date: 14.03.2019).

5. Load balancing with Round Robin DNS. URL: https://www.8host.com/blog/balansirovka-nagruzki-s-pomoshhyu-round-robin-dns/ (view date: 15.03.2019).

6. Comparative analysis of methods of balancing traffic. URL: https://habr.com/ru/company/oleg-bunin/blog/319262/ (view date: 18.03.2019).

7. Video conference by Oleg Bunin. URL: https://player.vimeo.com/video/151817241 (view date: 18.03.2018).

8. Introduction to the modern network of load balancing and proxies. URL: https://medium.com/southbridge/introduction-to-modern-network-load-balancing-and-proxying-52e8ca36adde (view date: 20.03.2019).

Рецензія/Peer review : 14.5.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-68-71
УДК: 621.39:004.8

Л.О. КОВТУН, М.В. СТРУТИНСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

# МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ПРО НАДАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ

*У зв'язку з бурхливим розвитком сфери телекомунікаційних послуг в Україні в останні роки важливого значення набуває проблема оптимального проектування телекомунікаційних систем з метою забезпечення ефективного використання апаратних і програмних засобів, найбільш повного задоволення потреб користувачів телекомунікаційних послуг, забезпечення швидкої окупності устаткування, впровадження гнучкої системи тарифів за послуги зв'язку. Розроблено метод оцінювання основних видів телекомунікаційних послуг для визначених груп абонентів на основі штучної нейронної мережі, що має важливе значення в області планування стратегій надання телекомунікаційних послуг.*

*Ключові слова: телекомунікаційні послуги, штучна нейронна мережа, система підтримки прийняття рішень.*

L.O. KOVTUN, M.V. STRUTINSKIY
Khmelnytskyi National University

## METHOD OF ACCEPTANCE OF THE PROVISION OF DECISION TELECOMMUNICATION SERVICES

*In connection with the rapid development of telecommunication services in Ukraine in recent years, the problem of optimal design of telecommunication systems for the purpose of ensuring the effective use of hardware and software, the most complete satisfaction of users of telecommunication services, ensuring the rapid payback of equipment, the introduction of a flexible tariff system becomes of paramount importance. for communication services. The article presents a method of estimating the main types of telecommunication services for certain groups of subscribers on the basis of an artificial neural network, which is important in the field of planning strategies for the provision of telecommunication services. The formal description of the decision support system model, the structure of the non-network optimization of the provision of services, the block diagram of optimization of the provision of telecommunication services is given. Based on the formalized TP model, a neural network method for assessing the payback of major types of telecommunication services for different groups of subscribers has been developed. The architectural features of ATM are determined, with the help of which this neural network method is realized.*

*Key words: telecommunication services, artificial neural network, decision support system.*

**Вступ.** Дослідженню окремих аспектів ринку телекомунікаційних послуг були присвячені праці таких іноземних та вітчизняних вчених, як А. Бруско [1], О. Дриль [2], О. Мітяєва [3], Н. Ребрікова [4] та інших. Досить багато уваги дослідженню питань розвитку світового ринку телекомунікацій присвячують засоби масової інформації. В Україні ж цією проблемою займається Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері зв’язку та інформатизації. У зв'язку з бурхливим розвитком сфери телекомунікаційних послуг в Україні в останні роки важливого значення набуває проблема оптимального проектування телекомунікаційних систем з метою забезпечення ефективного використання апаратних і програмних засобів, найбільш повного задоволення потреб користувачів телекомунікаційних послуг, забезпечення швидкої окупності устаткування, впровадження гнучкої системи тарифів за послуги зв'язку. Одним з варіантів вирішення даної проблеми може стати використання систем підтримки прийняття рішень при проектуванні телекомунікаційних систем і затвердженні тарифів за послуги зв'язку.

Актуальність роботи полягає в розробці методу оцінювання основних видів телекомунікаційних послуг для визначених груп абонентів на основі штучної нейронної мережі, що має важливе значення в області планування стратегій надання телекомунікаційних послуг.

**Аналіз надання телекомунікаційних послуг.** На сьогодні неможливо уявити сучасне суспільство без наявності телекомунікаційних послуг. Особливу роль у глобальній інформатизації суспільства відіграють засоби телефонного зв'язку. Вони у наш час представлені новими інформаційними технологіями, зокрема, мобільним зв'язком, IP-телефонією тощо. Телекомунікаційні канали зв'язку використовуються для масового доступу до глобальної мережі Internet. Широко поширені й інші телекомунікаційні послуги, зокрема, з'єднання домашніх комп'ютерів через швидкісну транспортну лінію (“місцевий Ethernet”).

Потреби населення у телекомунікаційних послугах постійно зростають, як і можливості телекомунікаційних компаній. Зрозуміло, що абоненти бажають, щоб ці послуги були найдешевшими, а оператори зацікавлені у швидкій окупності матеріальних витрат наданих послуг і одержанні прибутків.

Але у операторів зв'язку не завжди наявні можливості задоволення усіх висунутих вимог абонентів. Це зумовлено відсутністю технічних можливостей операторів, зокрема, відсутністю достатньої кількості швидкісних цифрових каналів, виділених підрозділам, а також відсутністю правових підстав – тієї чи іншої ліцензії на частоти номерного ресурсу тощо.

Виходячи з вимог абонента на той чи інший тип послуг, перед оператором зв’язку постає задача підбору технології, за допомогою якої таку послугу можна надати. Підбір технології визначається багатьма факторами, основні з яких це вартість, масштабованість (можливість нарощувати за необхідності

технологічну ємність), окупність тощо.

Основною задачею є економічна доцільність надання телекомунікаційних послуг з врахуванням реального стану надання цих послуг у конкретних мікрорайонах міст. Така задача є важко формалізованою, тому для її розв'язку не підходять алгоритмічні методи. Ефективним підходом для її вирішення є розроблення і подальше впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для визначення стратегій надання телекомунікаційних послуг згаданим вище групам абонентів. У цьому випадку доцільно застосувати інтелектуальні методи розв'язку задачі за допомогою штучного інтелекту. Для вирішення такої задачі найкраще підходить апарат штучних нейронних мереж (ШНМ).

**Формалізований опис моделі СППР надання телекомунікаційних послуг.** Для формалізації процесу надання телекомунікаційних послуг розроблено його структуру (рис. 1).

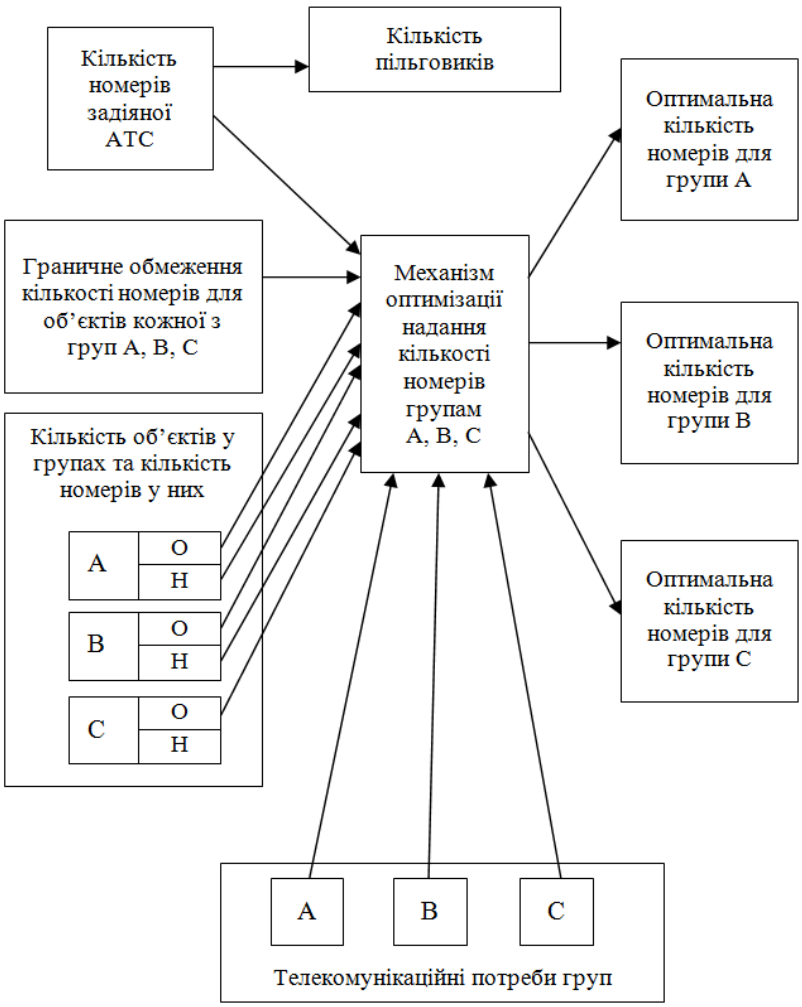



**Рис. 1. Структурна схема оптимізації надання телекомунікаційних послуг**

Вихідними параметрами механізму оптимізації надання кількості номерів приймемо, згадані раніше, першу А-групу, другу В-групу та третю С-групу абонентів. Кількість об'єктів у групах визначиться множиною $O = \{O_i;\ i = \overline{1,k}\}$.

Кількість телефонних номерів у групах визначиться множиною $H = \{H_j;\quad j = \overline{1,m}\}$. Телекомунікаційні потреби абонентських груп А, В, С визначаються множиною елементів $П = \{П_T, П_I, П_E, П_{I.B.}, П_{I.Ш.}, П_{Ц.К.}, П_{Р.З.}, П_{ін.}\}$,

де $П_T$ — потреба у телефонному зв'язку;

$П_I$ — потреба доступу до мережі Internet;

$П_E$ — потреба у місцевому Ethernet;

$П_{I.B.}$ — потреба доступу до Internet по виділеній лінії;

$П_{I.Ш.}$ — потреба у виділеному швидкісному Internet;

$П_{Ц.К.}$ — потреба у цифрових каналах для виділених підрозділів та партнерів;

$П_{Р.З.}$ — потреба у радіозв'язку малого радіусу дії типу DECT;

$П_{ін.}$ — інші потреби.

Обов'язково також має бути врахованим такий вихідний параметр, як кількість телефонних номерів $К_{Т.Н.}$ задіяної АТС у районі, де планується надавати згадані телекомунікаційні послуги. Береться до уваги також і кількість пільговиків, що проживають у даному районі.

Механізм оптимізації надання кількості номерів по групах визначає оптимальну кількість номерів, що може надатись для кожної із груп А, В, С, та об'єм телекомунікаційних послуг з врахуванням їх окупності і, відповідно, прибутковості підприємства-оператора.

Для моделювання розв'язку зазначеної неформалізованої задачі відображено структурну схему надання телекомунікаційних послуг ШНМ (рис. 2).

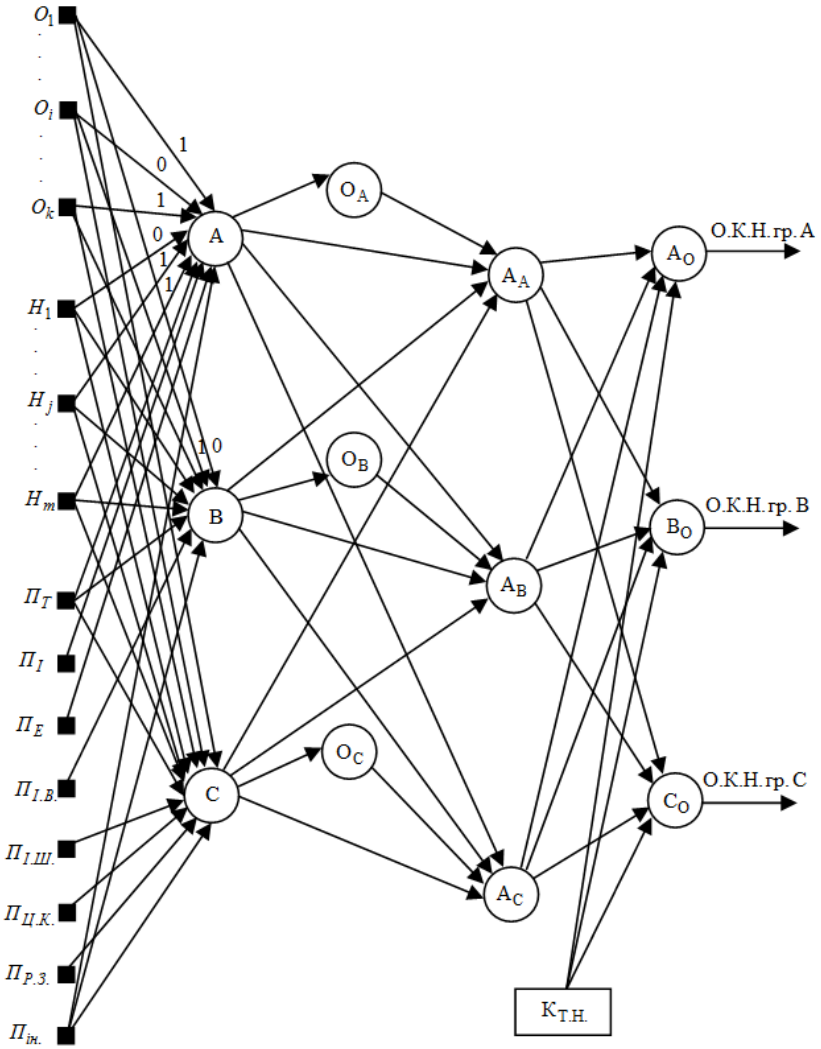



**Рис. 2. Структура нейромережі оптимізації надання послуг**

Архітектура розробленої ШНМ відповідає прямонапрямленому багатошаровому персептрону. Вхідний шар ШНМ відображає групи абонентів А, В, С з множинами входів, перерахованими раніше при розгляді структурної схеми оптимізації надання телекомунікаційних послуг. В ШНМ наявні два приховані шари нейронів: $0 = \{0_A,0_B,0_C\}$ та $A = \{A_A,A_B,A_C\}$. Перший з них відображає максимальне обмеження кількості телефонних номерів у групах А, В, С, а другий є апроксимаційним і призначений для апроксимації функції. Взагалі, обидва приховані шари можна розглядати як один апроксимаційний. У цьому випадку точність апроксимації збільшується у зв'язку зі збільшенням кількості нейронів у прихованому шарі.

Функціонали вихідного шару ШНМ відповідають оптимальній кількості телефонних номерів для груп А, В, С абонентів.

За функції активації нейронів у багатошаровому персептроні прийнято найбільш прийнятні для ШНМ цього типу сигмоїдну та стрибкоподібну функції.

ШНМ навчається за широко описаними в літературі алгоритмами навчання персептрона із застосуванням навчаючого правила корекції помилки.

Алгоритм А1 навчання і функціонування мережі полягає у наступному.

А1.1. Присвоїти значення ваговим коефіцієнтам $W$ випадковим чином або за даними експертів.

А1.2. Ввести вхідний вектор, що відповідає множинам $O$, $H$, $П$, $K_{T.H.}$

А1.3. Ввести величини виходів $A_O$, $B_O$, $C_O$ навчаючої вибірки ненавченої мережі.

А1.4. Ввести кількість ітерацій для навчання ШНМ.

А1.5. Задати швидкість навчання $\Delta W$.

А1.6. Одержати вагові коефіцієнти $W$.

А 1.7. Ввести вхідний вектор для функціонування ШНМ і одержання функціоналів.

А1.8. Кінець алгоритму.

Вагові коефіцієнти модифікуються за відомою формулою (1):

$$\omega_{i,j}(p+1)=\omega_{i,j}(p)+\eta\delta x_i, \quad (1)$$

де $p$ і $p+1$ – номери поточної та наступної ітерацій;

$\eta$ – коефіцієнт швидкості навчання, $0<\eta<1$;

$x_i$ – номер *i*-го входу;

$j$ – номер нейрона у наступних шарах.

**Висновки.** Розроблена формалізована модель надання телекомунікаційних послуг абонентам різних груп та побудована структурна схема оптимізації надання телекомунікаційних послуг.

На основі формалізованої моделі надання ТП розроблено нейромережний метод оцінки окупності основних видів телекомунікаційних послуг для різних груп абонентів. Визначено архітектурні особливості ШНМ, за допомогою якої реалізується даний нейромережний метод.

**Література**

1. Брушко А.В. Застосування інструментів маркетингу для підвищення роботи підприємства / А.В. Брушко // Зб. Наук. праць студентів Національного університету кораблебудування. – 2011. – № 1. – С. 154–158.

2. Дріль О.І. Маркетингові дослідження (на прикладі ринку телекомунікацій) / О.І. Дриль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Логістика». – 2008. – № 633. – С. 215–223.

3. Митяева О.А. Методологические аспекты анализа мотивационного профиля потребления на рынке услуг сотовой связи / О.А. Митяева // Вестник Российского государственного торговоэкономического университета. – 2011. – № 4. – С. 142–147.

4. Ребрикова Н.В. «Marketing-miks» в сфере телемуникационных услуг / Н.В. Ребрикова // Вестник Российского государственного торговоэкономического университета. – 2011. – № 2. – S. 95 – 102.

**References**

1. Brushko A.V. Zastosuvannia instrumentiv marketynhu dlia pidvyshchennia roboty pidpryiemstva / A.V. Brushko // Zb. Nauk. prats studentiv Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia. – 2011. – № 1. – S. 154–158.

2. Dril O.I. Marketynhovi doslidzhennia (na prykladi rynku telekomunikatsii) / O.I. Dryl // Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Seriia «Lohistyka». – 2008. – № 633. – S. 215–223.

3. Mityaeva O.A. Metodologicheskie aspekty analiza motivacionnogo profilya potrebleniya na rynke uslug sotovoj svyazi / O.A. Mityaeva // Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo torgovoekonomicheskogo universiteta. – 2011. – № 4. – S. 142–147.

4. Rebrykova N.V. «Marketing-miks» v sfere telemunykatsyonnыkh usluh / N.V. Rebrykova // Vestnyk Rossyiskoho hosudarstvennoho torhovoэkonomycheskoho unyversyteta. – 2011. – № 2. – S. 95 – 102.

Рецензія/Peer review : 15.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-72-79
УДК 004.85, 004.89, 004.9

П.Б. ВІТИНСЬКИЙ, Р.О. ТКАЧЕНКО, І.В. ІЗОНІН, Н.О. КУСТРА
Національний університет «Львівська політехніка»

# АНСАМБЛІ НЕЙРОПОДІБНИХ СТРУКТУР МПГП З RBF РОЗШИРЕННЯМ ВХОДІВ ДЛЯ ЗАДАЧ РЕГРЕСІЇ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ

*У роботі описано архітектурні принципи створення, топології і особливості застосування ансамблів штучних нейронних мереж з неітеративним навчанням. Подаються і обґрунтовуються основні кроки побудови гібридних нейроподібних структур, що лежать в основі функціонування ансамблів, висвітлені базові структури зав'язків між елементами. Обґрунтовано доцільність їх використання. Описано метод побудови ансамблю на основі дихотомії. Надано алгоритмічну реалізацію методу, наведено блок-схему його роботи для обох базових нейроподібних структур, які покладено в основу ансамблів. Моделювання роботи обох ансамблів проведено на реальних даних задачах прогнозування. Описано основні атрибути вибірки даних, наведено її візуалізацію. Надано результати експериментального дослідження щодо точності та швидкості роботи обох розроблених ансамблів. Встановлено, що ансамбль на основі комбінованої нейроподібної структури з додатковим RBF шаром забезпечує вищі показники точності роботи при тривалішій процедурі навчання. Здійснено порівняння роботи розроблених ансамблів з рядом існуючих методів. Встановлено найвищу точність роботи ансамблю на основі комбінованої нейроподібної структури з додатковим RBF шаром. Розроблені ансамблі можна використовувати для розв'язання задач регресії і класифікації в різних областях.*

*Ключові слова: ансамбль, неітеративні алгоритми навчання, нейроподібні структури, машинне навчання, прогнозування, класифікація.*

P.B. VITYNSKIY, R.O. TKACHENKO, I.V. IZONIN, N.O. KUSTRA
Lviv Polytechnic National University

## THE ENSEMBLES OF SGTM NEURAL-LIKE STRUCTURES WITH RBF LAYER FOR REGRESSION AND CLASSIFICATION TASKS

*The developed ensembles of non-iterative artificial neural networks are described. The basic steps of constructing hybrid neural-like structures which are the basic of ensembles and their topology are given. Their usage is grounded. The method of constructing an ensemble based on dichotomy is described. The algorithmic implementation of method and block-scheme for both neural-like structures underlying ensembles are presented. Modelling of both ensembles performed on real-life forecasting problem. Attributes of the dataset are described and visualized. The results of experimental research including accuracy and speed for both developed ensembles are presented. The ensemble based on a combined neural-like structure of SGTM with RBF layer provides higher accuracy with the longer procedure of training. Comparison between developed ensembles and existing methods is made. The ensemble based on the combined neural-like structure with RBF shows the highest accuracy. The developed ensembles can be used for regression and classification tasks in different in various areas.*

*Keywords: ensemble, non-iterative training algorithms, neural-like structures, machine learning, forecasting, classification.*

## Вступ

Завдання ефективного опрацювання даних великих обсягів, тобто пошук методів та способів автоматичного та швидкого аналізу великих об'ємів даних, є важливою в багатьох сферах індустрії. Серед ефективних підходів до її розв'язання являється застосування методів машинного навчання. Ці методи дозволяють знаходити в наборах даних початково невідомі, складні взаємозалежності та закономірності [1].

Однією із задач, які доволі часто виникають у різних прикладних областях, є задача регресії. Задача регресії або навчання за прецедентами, полягає у побудові та навчанні моделі, що буде прогнозувати значення цільової змінної на основі набору вхідних даних. Існуючі методи машинного навчання не завжди забезпечують [2]:

точний результат;

достатні генералізаційні властивості;

швидке опрацювання даних великих обсягів.

Саме тому існує потреба у розробленні нових методів опрацювання великих наборів даних, які нівелюватимуть описані вище недоліки.

Існує чимало підходів до опрацювання даних великих обсягів на основі ансамблів [3]. Згідно з [4] останні можна розділити на дві групи: послідовні та паралельні. Прикладом першого може бути метод Adaboost, прикладом другого – Random Forest [5]. Побудова ансамблю може відбуватися за різними алгоритмами [6]. У цій роботі ми використовуємо ідею кооперації між елементами ансамблю, де навчання кожного з елементів ансамблю проходить паралельно. Для цього необхідне розбиття загальної великої вибірки на менші складові. Опрацювання окремих вибірок даних може забезпечити підвищення точності роботи методу загалом.

## Аналіз попередніх досліджень

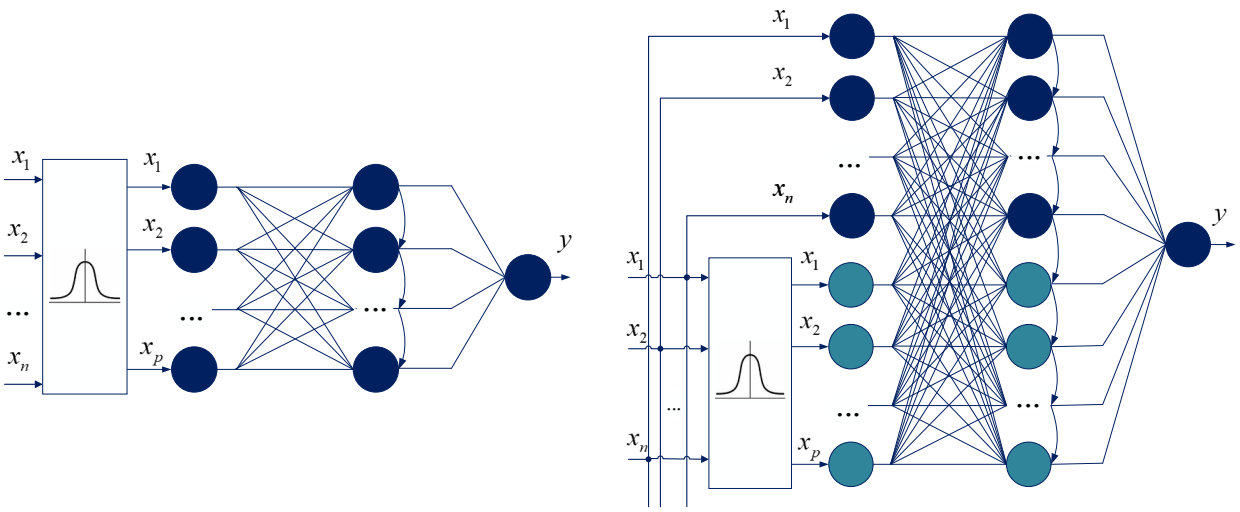
У [7] описано новий неітераційний інструмент штучного інтелекту для розв'язання задач регресії. Парадигма побудови штучних нейронних мереж, закладена в його основі (Модель послідовних геометричних перетворень – МПГП), використовує жадібний алгоритм навчання. Нейроподібні структури, побудовані з використанням цієї моделі, забезпечують високу швидкодію навчання за хороших показників щодо точності роботи [8]. Основні переваги цієї моделі перед існуючими нейронними мережами прямого

поширення, а також деталі алгоритмів її навчання і застосування описано у [9].

У [10] з метою підвищення точності розв'язання задачі регресії розроблено дві гібридні структури цього інструменту обчислювального інтелекту (рис. 1):

нейроподібна структура МПГП з додатковим RBF шаром;

комбінована нейроподібна структура МПГП з додатковим RBF шаром.




**а)** **б)**

**Рис. 1. Топології гібридних нейроподібних структур МПГП з додатковим RBF шаром**

Основна ідея гібридизації обох полягає у розширенні початкових входів із використанням додаткового RBF шару. Метою такого розширення є збільшення розмірності простору вхідних даних задачі для отримання більш точного результату. Враховуючи неітераційність роботи обраного інструменту, таке розширення з точки зору швидкодії роботи є доречним.

Для побудови такої структури з рис. 1*а* необхідно [11]:

1. обрати $P$ довільно розподілених точок з навчальної вибірки, вхідні компоненти яких будуть координатами центрів RBF;

2. обрати параметр гаусівської функції активації $\sigma$;

3. обчислити евклідові відстані від кожного $i$-го вектора навчальної та тестової вибірки до кожного центра RBF:

$$R_{p,i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (xc_{p,j} - x_{i,j})^2}, \quad (1)$$

де $p = \overline{1,\mathrm{P}}$ є центром; $i = \overline{1,N}$.

обчислити гаусівську функції для усіх (1):

$$F_{p,i} = \exp(-\frac{R_{p,i}^{\ 2}}{\sigma^2}) \quad (2)$$

В результаті виконання таких перетворень початкові входи повністю замінюються на розширені. Розмірність вхідних даних після розширення залежить від кількості RBF центрів, обраних користувачем. Основною відмінністю другого гібриду є те, що він сумісно використовує як початкові входи задачі, так і розширення на основі RBF (рис. 1*б*). Ця комбінація дозволяє підвищити екстраполяційні властивості гібридної структури, чим збільшити точність розв'язання задач класифікації та регресії. З рис. 1*б* видно, що вхідний шар формується із кількості нейронів, яка є рівною сумі вхідних початкових входів задачі та розширених входів із використанням RBF генератора.

Метою роботи є підвищення точності розв'язання задач класифікації та регресії шляхом побудови ансамблів нейроподібних структур моделі послідовних геометричних перетворень з додатковим RBF шаром.

**Побудова ансамблів**

У роботі пропонується метод побудови ансамблю із використанням дихотомії. Для цього, існуючу вибірку даних розбиваємо на частини згідно з запропонованим алгоритмом. Основними кроками алгоритму для побудови ансамблю нейроподібних структур МПГП з додатковим RBF шаром є такі:

розділити існуючу вибірку на навчальну та тестову;

обчислити середнє значення вихідної змінної **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** в обох вибірках;

здійснити навчання обраної нейроподібної структури (рис. 1а чи 1б);

застосувати як навчальну, так і тестову вибірки в режимі тестування для отримання поверхні

відгуку **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** для кожної з вибірок;

розділити як навчальну, так і тестову вибірки на дві підвибірки. До першої увійдуть вектори даних, для яких **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**, до другої – усі інші;

повторити алгоритм спочатку з кожною з двох отриманих підвибірок до заданих критеріїв зупинки.

Блок-схема алгоритму для поділу навчальної вибірки на дві підвибірки представлено на рис. 2. Таким самим чином відбувається поділ тестової вибірки на частини. В результаті виконання наприклад одного кроку описаного алгоритму ми отримаємо дві підвибірки для двох нейроподібних структур із рис. 2. Для двох кроків поділу ми отримаємо 4 нейроподібні структури і т.д. Поділ продовжуємо за заданих критеріїв зупинки. Слід зазначити, що під *Нейроподібною структурою МПГП* на рис. 2 розуміється або перший, або другий її гібрид залежно від ансамблю, що будується.

Після виконання алгоритму ми отримаємо ансамбль з $k$ нейроподібних структур, кожна з яких буде опрацьовувати якусь унікальну частину із загальної вибірки даних.

Застосування такого ансамблю дозволить зменшити похибки прогнозування [12] та збільшити генералізуючі властивості нейроподібних структур, а використання паралельних обчислень, зокрема на багатопроцесорному ПК зменшити час процедури опрацювання даних великих обсягів [13]. Окрім цього можлива ефективна апаратна реалізація такого підходу [14].

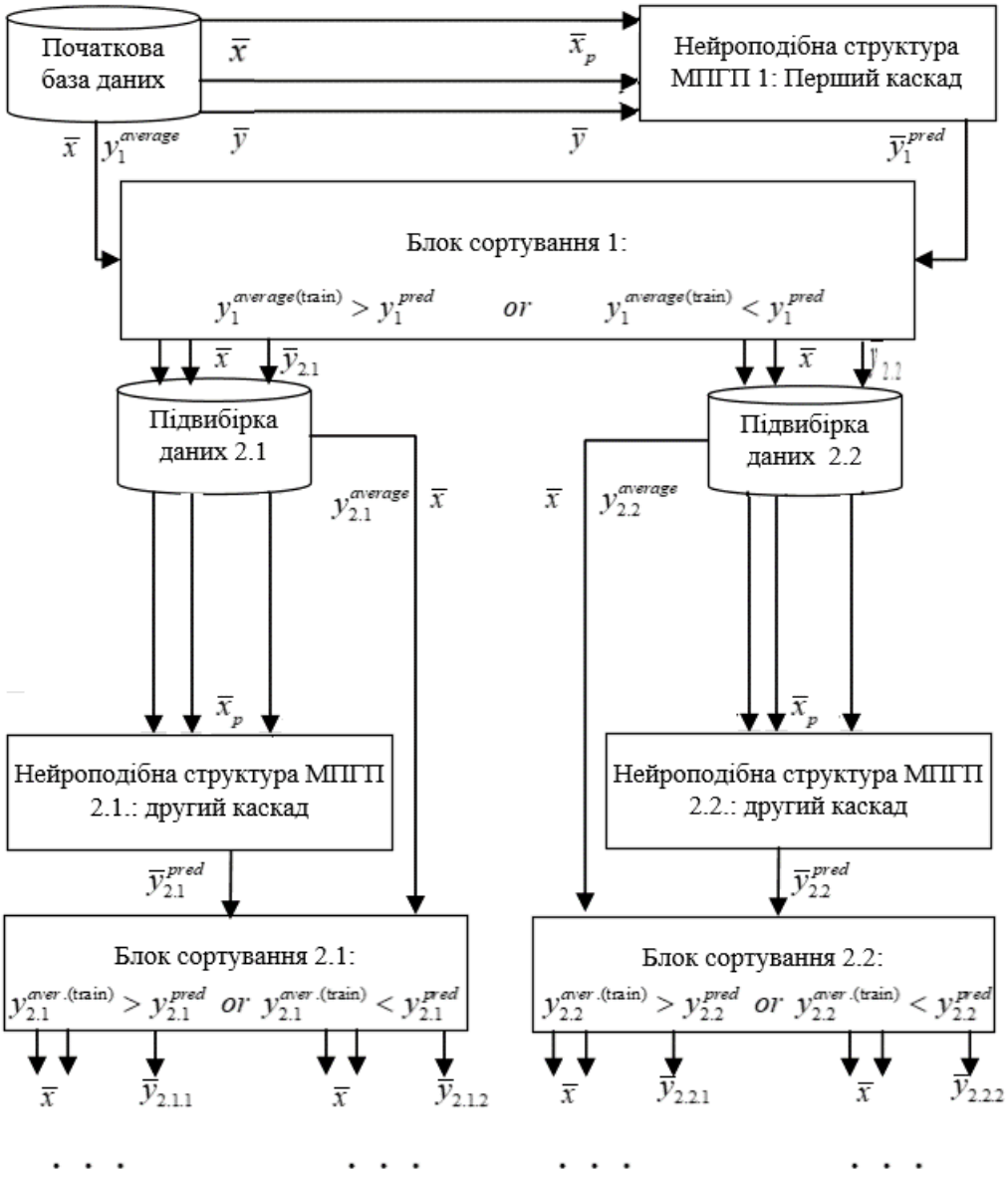



**Рис. 2. Блок-схема розробленого алгоритму**

## Моделювання

Моделювання роботи методу відбувалося на 1338 спостереженнях щодо величини страхових виплат у чотирьох областях США. Цю задачу прогнозування на реальних даних взято із [15]. Вона містила 6 факторних змінних, деякі з яких набували текстових значень. З метою моделювання, вибірку модифіковано наступним чином (Таблиця 1): замість 6 факторних ознак утворено 11 числових факторних змінних [7], які

візуалізовано з використанням Orange [15] на рис. 3. Кольором на рис. 3 виділено курців (синій) та не курців (червоний колір). Різні фігури позначають чоловіків та жінок, а величина фігура визначає розмір страхових виплат.

Таблиця 1

**Характеристики вибірки даних**

| Назва атрибута | Характеристика |
|---|---|
| Вік особи | Мінімальний – 18 років; максимальний – 64 років; середній – 39.2 |
| Чоловіки | 676 |
| Жінки | 662 |
| Індекс маси тіла, kg/m2 | Мінімальний – 15.96; максимальний – 53.13; середній – 30.66 |
| Кількість дітей | Мінімальна – 0; максимальна – 5; середня – 1.095 |
| Курці-чоловіки | 517 |
| Курці-жінки | 115 |
| Область проживання: північний захід (у США) | 325 |
| Область проживання: південний схід (у США) | 364 |
| Область проживання: північний схід (у США) | 324 |
| Область проживання: південний захід (у США) | 325 |

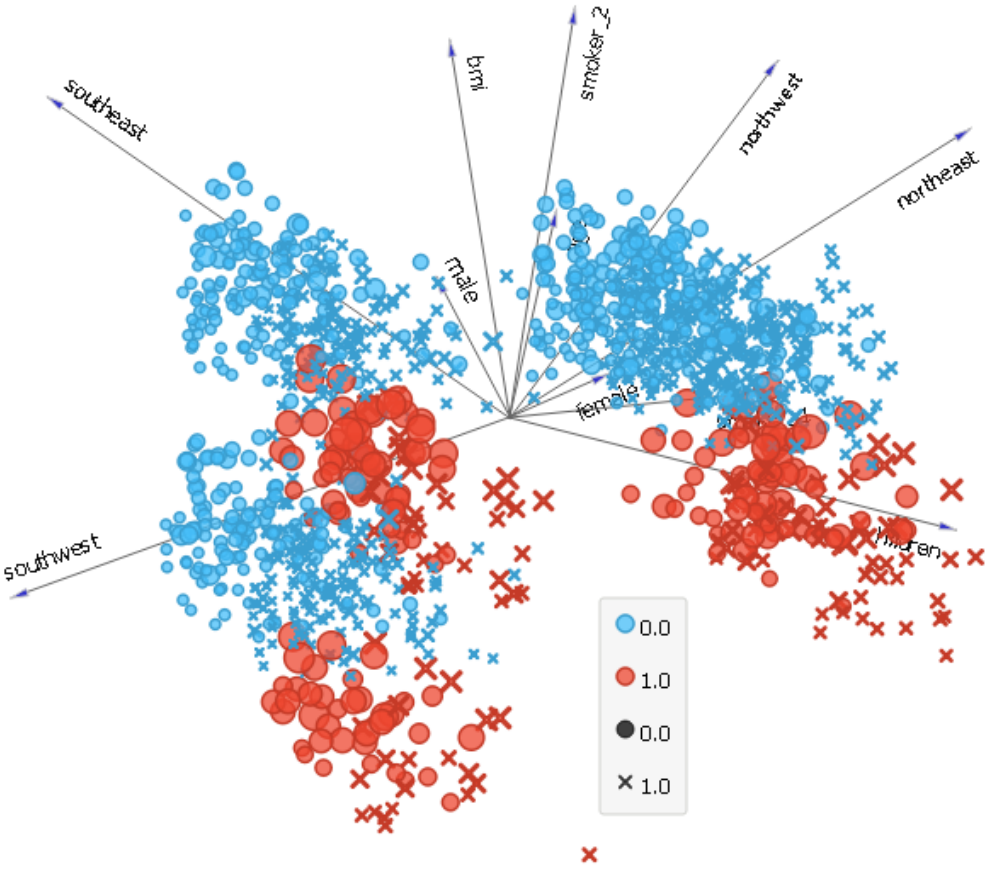



**Рис. 3. Візуалізація вибірки даних**

Вибірку даних розділено у співвідношенні 1070 до 268 векторів відповідно для навчальної та тестової. Основними параметрами алгоритму є: один крок поділу вибірки на дві підвибірки, тобто лише дві нейроподібні структури комітету, 100 центрів RBF, $\sigma = 5$ (як для першої, так і для другої гібридної структури). Відповідно до обраних параметрів, кожна із структур ансамблю містила;

100 нейронів у вхідному та прихованому шарах для нейроподібної структури МПГП з додатковим RBF шаром (рис. 1*а*) (ансамбль на основі першого гібриду);

111 нейронів у вхідному та прихованому шарах для комбінованої нейроподібної структури МПГП з додатковим RBF шаром (рис. 1*б*) (ансамбль на основі другого гібриду). Варто зазначити, що кількість нейронів вхідного та прихованого шарів в цьому випадку складалася з двох частин: 100 з них це розширення входів із використанням RBF, а решта 11 – це початкові входи вибірки даних із табл. 1.

Результати похибок прогнозування з використанням нейроподібних структур обох ансамблів для кожної підвибірки даних, а також їх зважене значення надано у табл. 2 та табл. 3. Слід зазначити, що

результати роботи розроблених ансамблів подано для обох режимів його роботи (навчання та тестування).

Таблиця 2

**Ефективність роботи ансамблю на основі першого гібриду**

| **Вибірки** | ***Розмірність, векторів*** | **Показники ефективності** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **MAPE, *%*** | **RMSE** | **SMAPE** |
| Режим навчання | | | | |
| Підвибірка 1 | 682 | 36,050815 | 5765,6463 | 0,141925 |
| Підвибірка 2 | 388 | 32,641979 | 4657,3945 | 0,115016 |
| *Зважене значення* | *1070* | 34,814714 | 5363,7755 | 0,132167 |
| Режим тестування | | | | |
| Підвибірка 1 | 176 | 41,594660 | 4500,0046 | 0,200104 |
| Підвибірка 2 | 92 | 18,203836 | 6668,2257 | 0,094108 |
| *Зважене значення* | *268* | 33,564974 | 5244,3193 | 0,164046 |

Таблиця 3

**Ефективність роботи ансамблю на основі другого гібриду**

| **Вибірки** | ***Розмірність, векторів*** | **Показники ефективності** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **MAPE, *%*** | **RMSE** | **SMAPE** |
| Режим навчання | | | | |
| Підвибірка 1 | 729 | 30,859413 | 4904,61659 | 0,117006 |
| Підвибірка 2 | 341 | 32,294283 | 4940,75105 | 0,116870 |
| *Зважене значення* | *1070* | *31,316694* | *4916,13235* | *0,116963* |
| Режим тестування | | | | |
| Підвибірка 1 | 186 | 35,190399 | 4404,82332 | 0,173066 |
| Підвибірка 2 | 82 | 18,765715 | 7063,32974 | 0,094458 |
| *Зважене значення* | *268* | *30,164936* | *5218,24693* | *0,149014* |

У Таблиці 4 подано значення тривалості процедур навчання для: усієї вибірки даних, двох підвибірок, що були утворені внаслідок одного кроку поділу та загальний час навчання (для одного кроку поділу) кожного з ансамблів. Останній визначався як сума часу навчання усієї вибірки та найбільшого часу навчання однієї із двох підвибірок даних. Таку формулу було обрано у зв'язку із можливістю використання паралельної обробки обох підвибірок, оскільки вектори даних у них не повторюються.

Таблиця 4

**Час тривалості процедур навчання обох ансамблів**

| **Вибірка** | **Час навчання ансамблю на основі першого гібриду, секунд** | **Час навчання ансамблю на основі другого гібриду, секунд** |
|---|---|---|
| Ціла вибірка | 0,073339939 | 0,0987722873687744 |
| Підвибірка 1 | 0,037760496 | 0,0533866882324218 |
| Підвибірка 2 | 0,050544262 | 0,0689921379089355 |
| *Загальний час навчання ансамблю для одного кроку поділу* | *0,123884201* | *0,167764425277710* |

Саме зважене значення похибок в режимі тестування роботи ансамблю із табл. 2 та табл. 3 та загальний час навчання ансамблю з табл. 4 бралися до уваги при порівнянні роботи розроблених ансамблів з існуючими методами.

**Порівняння та обговорення**

Для порівняння роботи розроблених ансамблів використано традиційні регресійні методи (багатошаровий перцептрон, нейронна мережа узагальненої регресії, алгоритм AdaBoost та лінійна регресія на основі стохастичного градієнтного спуску), а також існуючі неітеративні розробки (нейроподібна структура МПГП, нейроподібна структура МПГП з RBF шаром (рис. 1*а*) та комбінована нейроподібна структура МПГП з RBF шаром (рис. 1*б*)).

У роботі проведено експериментальне оцінювання похибок як режиму навчання, так і застосування усіх досліджуваних методів (рис. 4), а також тривалість їхнього навчання (рис. 5).

Як видно з рис. 4 існуючі ітеративні методи (багатошаровий перцептрон, алгоритм AdaBoost та лінійна регресія на основі Стохастичного градієнтного спуску) показують точність роботи розв'язання задачі прогнозування страхових виплат меншу за 50 %. Окрім цього, багатошаровий перцептрон демонструє найнижчу швидкість роботи (рис. 5). Алгоритм AdaBoost та лінійна регресія на основі стохастичного градієнтного спуску демонструють одні з найкращих результатів щодо часу їх навчання, проте, зважаючи на показники точності, це незадовільний результат.

**Рис. 4. Порівняння точності роботи усіх досліджуваних методів**

**Рис. 5. Порівняння часу навчання усіх досліджуваних методів**

Нейронна мережа узагальненої регресії демонструє високу точність роботи: більш ніж на 1,5% нижчу MAPE за один із розроблених ансамблів. Проте, ця нейронна мережа демонструє один із найгірших показників щодо часу процедури застосування (оскільки навчання як такого вона не має). Вона займає передостаннє місце щодо цього критерію із усіх досліджених методів і працює в 3 рази повільніше за розроблений ансамбль на основі другого гібриду. Окрім цього, для отримання такого високого результату щодо точності, оптимальний параметр її роботи $\sigma$ $(\sigma = 0.4)$ підбирався експериментальним шляхом $(\sigma \in [0.1,1.5], \Delta = 0.1)$, де для кожного $\sigma$ із заданого інтервалу затрачався приблизно такий же час ($\approx 0{,}533577$ seconds) для реалізації процедури навчання. З огляду на це, результат роботи цієї мережі також

не є оптимальним.

Якщо розглядати роботу найбільш подібних, неітераційних методів, то один із найвищих показників щодо швидкості роботи демонструє нейроподібна структура МПГП. Проте точність роботи цього інструменту сягає близько 59%, чого також недостатньо для розв'язання поставленої задачі. Результати роботи двох її гібридів з рис. 1 показують у 2,7 та 2,9 разів відповідно меншу швидкість реалізації процедури навчання. Це пояснюється збільшенням кількості входів цих неітеративних інструментів з 11 у базового інструменту до 100 та 111 у першого та другого гібриду відповідно. Проте як перша, так і друга гібридна нейроподібні структури показують значне збільшення точності роботи під час розв'язання поставленої задачі: на більш ніж 5% та 6% відповідно.

Ансамбль, побудований на основі першого гібриду, як і очікувалося, демонструє як збільшення точності (на 3,3% вища точність на основі MAPE), так і часу навчання (у 1,68 разів довше) в порівнянні з роботою однієї базової структури (рис. 1*а*).

Ансамбль побудований на основі використання другого гібриду демонструє найвищі значення у точності роботи як згідно MAPE так і RMSE. Він показує більше ніж на 5% збільшення точності в порівнянні із роботою однієї базової нейроподібної структури (рисю 1*б*) при збільшенні швидкості процедури навчання лише у 2 рази.

Розроблений ансамбль на основі другого гібриду за рахунок комбінованого використання як початкових входів, так і їх розширення з використанням RBF значно збільшив вимірність кожного вхідного вектору даних ( з 11 до 111). Проте це сприяло значному підвищенню екстраполяційних властивостей кожної нейроподібної структури ансамблю. В порівнянні, ансамбль на основі першого гібриду використовував лише замінені початкові входи (11) на RBF входи (100). Це не забезпечило значного збільшення точності. Зокрема, ансамбль на основі другого гібриду забезпечує на 3,4% вищу точність прогнозу при збільшенні часу навчання в 1,34 рази в порівнянні із ансамблем на основі першого гібриду. Це може сприяти його використанню для розв'язання практичних задач у сфері медичного страхового бізнесу, електронної комерції, медицини, економіки, матеріалознавства тощо.

**Висновки**

Авторами розроблено ансамблі неітеративних нейроподібних засобів штучного інтелекту підвищеного рівня точності і генералізації. Їх принципи побудови базуються на використанні набору гібридних нейроподібних структур МПГП. Гібридизація полягала у сумісному або комбінованому використанні початкових та RBF входів. В результаті використання такої комбінації, простір вхідних даних суттєвим чином розширювався. Це впливало як на точність роботи кожної окремої мережі ансамблю та її екстраполятивні властивості так і на швидкодію процедур навчання. З огляду на неітеративність характеру процедури навчання, значне розширення простору вхідних даних задачі для підвищення точності має сенс.

Моделювання роботи обох ансамблів відбувалося на задачі прогнозування страхових виплат. Експериментальним чином встановлено суттєве зменшення похибок роботи ансамблів у порівнянні із однією базовою нейроподібною структурою. Похибка зменшилася на 5% при невеликому підвищення часу процедури навчання.

Порівняння роботи розроблених ансамблів з існуючими методами обчислювального інтелекту, ітераційного та неітераційного типів підтвердили ефективність їх використання. Розроблений ансамбль на основі другого гібриду забезпечує найменшу похибку на основі MAPE та RMSE. Окрім цього він демонструє задовільні часові характеристики навчання про використанні двох структур у ансамблі. Розроблений ансамбль в програмному чи апаратному варіантах можна застосовувати для розв'язання задач регресії та класифікації на вибірках даних великих обсягів в різних галузях промисловості.

**Література**

1. Zhernova P. Y. Adaptive Kernel Data Streams Clustering Based on Neural Networks Ensembles in Conditions of Uncertainty about Amount and Shapes of Clusters / P. Y. Zhernova, A. O. Deineko, Y. V. Bodyanskiy, V. O. Riepin VO // 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, 2018, pp. 7–12. doi: 10.1109/DSMP.2018.8478616

2. Bodyanskiy Y. V. An evolving connectionist system for data stream fuzzy clustering and its online learning / Y. V. Bodyanskiy, O. K. Tyshchenko, D. S. Kopaliani // Neurocomputing, vol. 262, 2018, pp. 41–56. doi: 10.1016/j.neucom.2017.03.081

3. Rokach L. Taxonomy for characterizing ensemble methods in classification tasks: A review and annotated bibliography / Computational Statistics & Data Analysis, vol. 53, 2009, pp. 4046–4072. doi: 10.1016/j.csda.2009.07.017

4. Smolyakov V. Ensemble Learning to Improve Machine Learning Results / Stats and Bots., 2017. URL : https://blog.statsbot.co/ensemble-learning-d1dcd548e936. Accessed 24 Feb 2019

5. Ensemble Methods: Foundations and Algorithms. In: CRC Press. URL : https://www.crcpress.com/Ensemble-Methods-Foundations-and-Algorithms/Zhou/p/book/9781439830031. Accessed 24 Feb 2019

6. Sharkey AJC. Types of Multinet System. Roli F, Kittler J (eds) Multiple Classifier Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 108–117.

7. Tkachenko R. Development of the Non-Iterative Supervised Learning Predictor Based on the Ito Decomposition and SGTM Neural-Like Structure for Managing Medical Insurance Costs / R. Tkachenko, I. Izonin, P. Vitynskyi, N. Lotoshynska, and O. Pavlyuk // Data, vol. 3, no. 4, p. 46, Oct. 2018.

8. Doroshenko A. Piecewise-Linear Approach to Classification Based on Geometrical Transformation Model for Imbalanced Dataset / 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining Processing (DSMP), 2018, pp. 231–235.

9. Tkachenko R. Geometrikal data modelling / R. Tkachenko, P. Tkachenko, O. Tkachenko, and J. Schmitz, // Proceedings of the international conference on Intelligent systems of making decisions and applied aspects of information technology, Eupatoria, vol. 2, 2016, pp. 279–285.

10. Tkachenko R. Non-iterative Neural-like Predictor for Solar Energy in Libya / R. Tkachenko, H. Kutucu, I. Izonin, A. Doroshenko, and Y. Tsymbal // Proceedings of the 14th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume I: Main Conference, Kyiv, Ukraine, May 14–17, 2018, 2018, vol. 2105, pp. 35–45.

11. Babichev S. A Fuzzy Model for Gene Expression Profiles Reducing Based on the Complex Use of Statistical Criteria and Shannon Entropy / S. Babichev, V. Lytvynenko, A. Gozhyj, M. Korobchynskyi, and M. Voronenko // Advances in Computer Science for Engineering and Education, 2018, pp. 545–554.

12. Shakhovska N. Big data federated repository model / N. B. Shakhovska, Y. J. Bolubash, and O. M. Veres // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, 2015, pp. 382–384.

13. Tsmots I. Structure and Software Model of a Parallel-Vertical Multi-Input Adder for FPGA Implementation / I. Tsmots, O. Skorokhoda, V. Rabyk // Computer Sciences and Information Technologies - Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference, CSIT 2016, 2016, pp. 158–160.

14. “Medical Cost Personal Datasets”. URL : https://www.kaggle.com/mirichoi0218/insurance. Accessed: 08-Dec-2018.

15. Demšar et al. Orange: Data Mining Toolbox in Python. Journal of Machine Learning Research, vol. 14, pp. 2349–2353, 2013.

Рецензія/Peer review : 24.05.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Цмоць І. Г.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-80-83
УДК 004.94

О.В. ДЖУРАБАЄВ, О.В. БАРМАК, Е.А. МАНЗЮК, Т.К. СКРИПНИК
Хмельницький національний університет

# ІНФОРМАЦІЙНА ЗОСЕРЕДЖЕНІСТЬ ЗМІСТОВНОСТІ В ТЕКСТІ

*В роботі було запропоновано підхід для дослідження текстової інформації з описом його теоретичної частини. Підхід полягає в дослідженні текстової інформації як сигналу. Було реалізовано інформаційну технологію та проведено дослідження з описом результатів і побудовою графіків тексту.*

*Ключові слова: інформаційна технологія, аналіз тексту.*

O.V. DZHURABAIEV, O.V. BARMAK, E.A. MANZIUK, T.K. SKRYPNYK
Khmelnytskyi National University

## SEARCHING FOR CONTEXT IN THE TEXT

*Nowadays the search for keywords is not complicated, because there are effective algorithms for their search. The most popular algorithms are TF-IDF, the Bag of Words. There are main disadvantages of these methods: the removal of stopwords, the lack of including the position of each word in the text. The aim of research is development of information technology for searching context and test the effectiveness of to search for keywords in the text without removing stopwords and taking into attention the position of each word. Also, the aim of research is the development of information technology to find places of content concentration in the text with minimal time and low CPU usage returns the correct result for a certain range of tasks in the case of compliance with the limits of input data. The paper proposes an approach based on the analogy of the physical phenomenon of the signal, for constructing a "meaning recognizer", which does not require any training base, nor a deep machine analysis of the text, and returns the approximate result. The approach is to normalize the text, build the amplitude and phase vectors, and then plot the dependencies of the calculated parameters and visualize the text. Also described are the results of experiments on the recognition of content in the test data. The results of research have shown that the greatest effectiveness is obtained with a text belonging to a specific category. Information technology for the search of content in text information allows graphically to present text in the form of a three-dimensional model, which makes it possible to identify grouped concentrations. In the final case, this allows us to visually cluster groups of words that are a vector of signs of content concentration. Thus, the textual information is presented in the form of a clustered three-dimensional model based on the content concentration, presented in the form of key words of content. It is revealed the basic characteristics of text information as the basic representation after transformation in the form of numerical dimensional characteristics. This presentation is the basis for further research in the direction of clustering and text classification. The results of the research have confirmed that this method is effective for the case where the text belongs to one category. In case you research several texts of a similar category, you can create a set of words that best characterize these texts (the classifier's core). You can also conduct visually researches of texts as surfaces.*

*Keywords: information technology, text processing.*

Розвиток інформаційних технологій, включаючи соціальні мережі, форуми та інші ресурси, призводить до збільшення кількості користувачів, що породжує потребу класифікації та систематизації текстової інформації, і для часткового вирішення цієї проблеми існують готові програмні рішення. Мова – непроста річ, і сама ідея реалізації алгоритму розуміння людської мови є цікавим нетривіальним завданням, тому кожна технологія чудово підходить для вирішення конкретного, специфічного, вузького кола завдань. І хоч з 90-х років минулого століття і була реалізована велика кількість програмних продуктів для дослідження тексту, як новачками-аматорами, так і професіоналами, актуальність пошуку сенсу в текстовій інформації стоїть гостро й до сьогодні.

Серед багатьох відомих на даний час методів досліджень текстової інформації найбільшою популярністю користуються: метод частотного аналізу терму з врахуванням інверсії частоти до інших документів (Term Frequency – Inverse Document Frequency) [1], лінійний метод опорних векторів (Linear Support Vector Machine) [2] та метод так званого «мішка» або множини слів (Bag of Words) [3]. До переваг TF-IDF та Bag of Words можна віднести швидкість та масовість; головною перевагою методу опорних векторів є точність. До недоліків – повільність виконання, «відкидання» стоп-слів, що неминуче веде до втрати сенсу; відсутність врахування позиції кожного слова у тексті, що може провокувати ускладнення пошуку змісту в конкретному тексті.

Розпізнавання змісту в тексті, в ідеальному випадку, потребує розробки синтаксичного аналізатора мови, а також ряду програмних лінгвістичних компонентів. Окрім цього, для коректних результатів часто потрібно мати навчальну вибірку або базу, а також проводити ресурсозатратні обрахунки. Це пов’язано з тим, що результати проведення аналізу тексту можна умовно поділити на дві групи: до першої групи віднесемо випадок для якого достатньо наближених або приблизних результатів; в іншому випадку необхідно отримати на виході точні, конкретні результати [4].

Метою роботи є розробка інформаційної технології для пошуку місць зосередженості змісту в тексті, яка з мінімальними затратами часу та потужності ЕОМ повертає коректний результат для певного кола завдань у разі дотримання обмежень вхідних даних.

В роботі запропоновано підхід для побудови «розпізнавача» сенсу, який не потребує ні навчальної бази, ні глибокого машинного аналізу тексту і повертає наближений результат. Підхід полягає в нормалізації тексту, побудові векторів амплітуди та фази, після чого будуються графіки залежностей обрахованих параметрів та з’являється можливість аналізувати текст візуально. Також описані результати експериментів по розпізнаванню змісту в підготовлених текстах.

Вхідними даними для застосування технології є текстовий контент, який має певний сенс. Це може бути, наприклад, наукова стаття, кулінарний рецепт або якась новина чи повідомлення. Тематика інформації обмежується уявою користувача і може бути довільною. Важливим є лише те, що ця інформація повинна бути у вигляді текстового файлу.

В основі функціонування інформаційної технології пошуку сенсу в тексті є дослідження тексту як скінченної множини слів. Блок-схема роботи програми зображена на рис. 1. Розглянемо кожен пункт детальніше.

Зчитування даних передбачає подання на вхід користувачем файлу, що містить необхідну для аналізу текстову інформацію.

Фільтрація включає в себе видалення з тексту розділових знаків, html-тегів та усіх інших символів, які відсутні в алфавіті. Нормалізація – приводить кожне слово до нормальної форми [5], наприклад, для слова «технологією» нормальна форма – «технологія». Після нормалізації текстовий файл є множиною слів, приведених до нормальної форми.

В свою чергу, експрес-аналіз складається з кількох етапів, зображених на рис. 2.

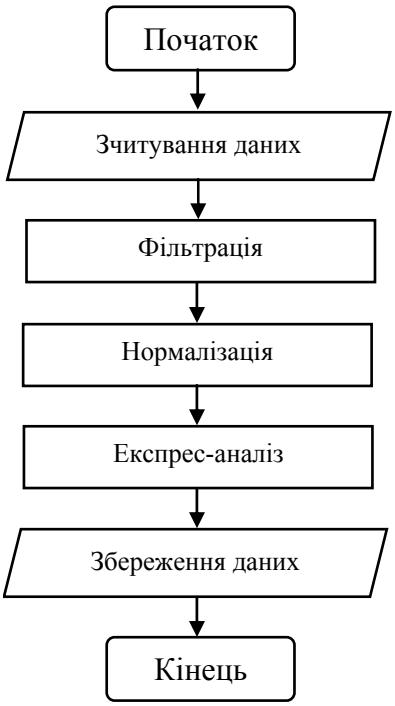



**Рис. 1. Блок-схема роботи інформаційної технології для пошуку сенсу в текстовій інформації**

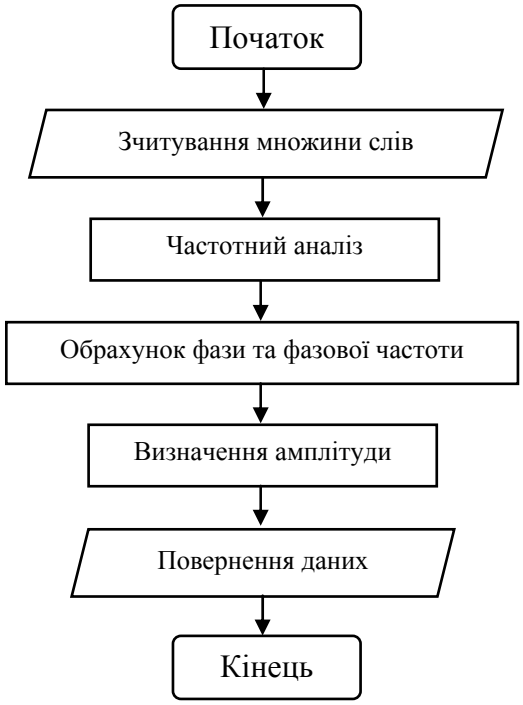



**Рис. 2. Блок-схема роботи експрес-аналізу текстової інформації**

Для кращого розуміння суті здійснених у розрахунках величин, проведемо аналогію з таким фізичним явищем, як сигнал. Так само, як сигнал є сукупністю змін фізичної величини [6], множину слів можна представити як сукупність термів та їх властивостей, які утворюють скінченний потік даних. Звідси слідує, що існує можливість дослідити кожен терм у тексті на предмет частоти, фази і амплітуди.

Позначимо множину слів як *W*, слово як *w*, множину унікальних термів як *S*, а терм як *s*.

Частота терму – це кількість його входжень у множину слів:

$$F(s_i) = \underset{w_i \in W}{count}(w_i), s \in S, i = 1, \ldots, |S| \tag{1}$$

Фазова частота терму – кількість входжень терму в підмножину множини слів. Нехай *W′* – підмножина множини слів, тоді:

$$F_\omega(s_i) = \underset{w_i \in W', W' \in W}{count}(w_i), s \in S, i = 1, \ldots, |S| \tag{2}$$

Фаза терму – індекс, при якому його фазова частота має максимальне значення:

$$\omega(s_i) = \underset{s_i \in S}{index}\left(argmax(F_\omega(s_i))\right), i = 1, \ldots, |S| \tag{3}$$

Амплітуда терму – максимальне значення зміщення або зміни кількості входжень терму від його середнього значення, іншими словами розсіювання конкретного терму в множині слів:

$$A(s_i) = \sum \left| \underset{s_i \in S}{index}(s_i) - \omega(s_i) \right| \tag{4}$$

Підставивши $\omega(s_i)$, отримаємо:

$$A(s_i) = \sum \left| \underset{s_i \in S}{index}(s_i) - \underset{s_i \in S}{index}\left(argmax(F_\omega(s_i))\right) \right| \quad (5)$$

Результати розрахунків за вище вказаними формулами записуються в файл, після чого можуть бути використані для візуалізації аналізу тексту.

Для прикладу візьмемо статтю «Приготування їжі як вид мистецтва». Вхідний файл містить 126 слів, з них унікальних, тобто термів – 80.

Нижче зображений точковий графік залежності амплітуди, частоти та її фази на прикладі вхідної статті. Кожна точка цього графіку є унікальним термом без повторень.

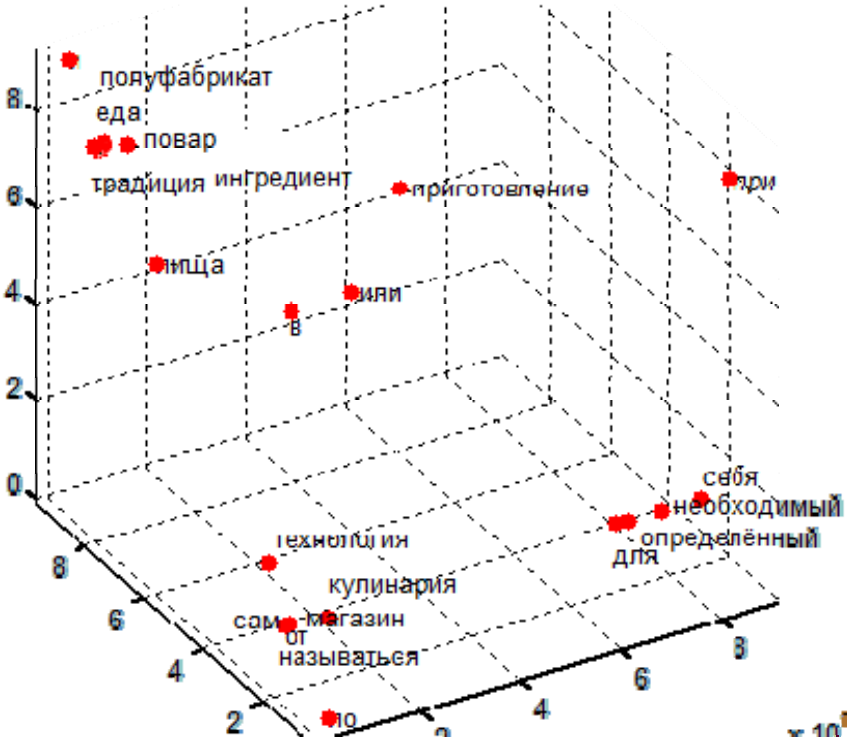



**Рис. 3. Точковий графік обробленої множини слів**

З тримірного представлення тексту (рис. 3) можна виділити кілька груп або кластерів. Якщо згрупувати множини точок частоти і амплітуди, утвориться графік так званої «густини» термів, приклад якого зображений на рисунку 4. Тут чітко можна розрізнити 4 кластери. Розглянемо їх.

Вектор термів, які мають велику амплітуду і малу частоту – рівномірно розподілені по всьому тексту та рідко зустрічаються. В даному випадку це слова: «для», «определённый», «необходимый», «при», «себя».

Вектор термів, які мають малу амплітуду та малу частоту – зустрічаються рідко, але концентровано. До нього входять наступні слова: «технология», «в», «магазин», «от», «сам», «кулинария», «называться», «по», «от», «или».

В ході ряду експериментів було виявлено, що терм або група термів, яка є рівновіддаленою від інших груп та має помірну амплітуду і частоту, утворює вектор контексту та її можна вважати головною тематикою текстової інформації. В даному випадку це один терм – «приготовление». Хоча за певних умов ця закономірність не справджується, особливо, коли вхідна текстова інформація не має чіткої тематики.

Слова «традиция», «полуфабрикат», «ингредиент», «кухня» та всі інші, які залишилися, мають високу частоту та малу амплітуду, що говорить про те, що вони часто зустрічаються на відносно малих ділянках тексту.

Дослідження тексту не обмежується побудовою «плоских» графіків, в деяких випадках може виявитись корисною поверхня. Наприклад, при дослідженні подібних за тематикою статей і побудові їх поверхонь можна дослідити точки перетину, – в широкому розумінні це буде ядро класифікатора або набір слів, які найкраще характеризують тему вхідного тексту.

Варто зазначити, що кращі результати можна отримати тільки в тому випадку, коли текстова інформація несе зміст з певної конкретної категорії. При «суміші» різноманітних тем в одній статті отримуються результати, за яких не вдається зробити коректний висновок щодо змісту тексту.

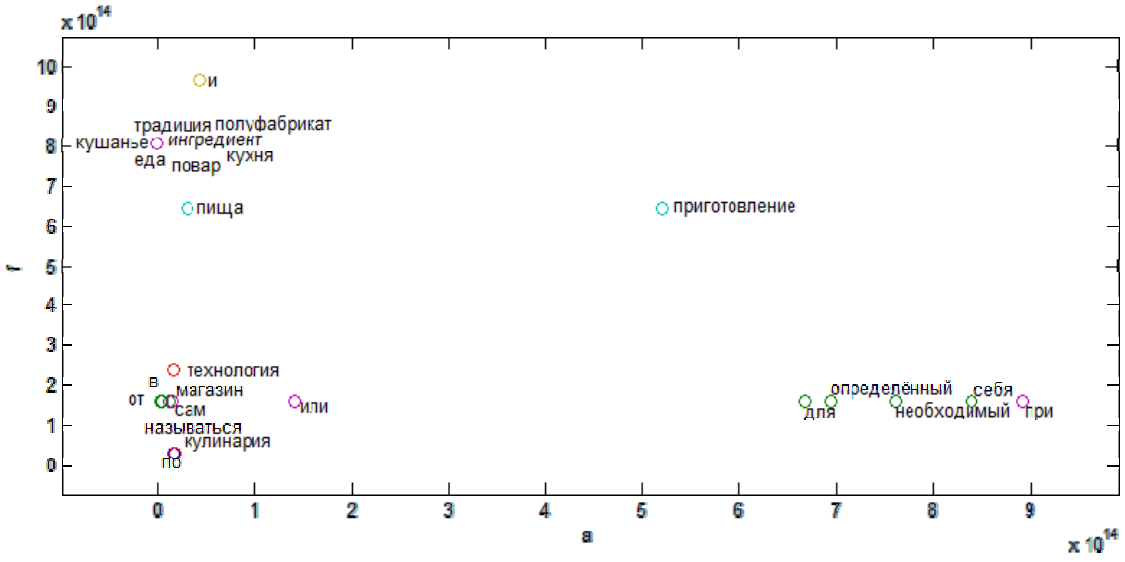



**Рис. 4. Графік густини термів**

## Висновки

Результати досліджень показали, що найбільша ефективність отримується при тексті, що належить до конкретної категорії. Інформаційна технологія для пошуку змісту в текстовій інформації дозволяє графічно представити текст у вигляді тримірної моделі, що дає можливість виявити груповані зосередженості. В кінцевому випадку це дозволяє візуально кластеризувати групи слів, які є вектором ознак концентрації змісту. Таким чином текстова інформація подається у вигляді кластеризованої тримірної моделі за ознаками зосередженості змісту, що представлена у вигляді ключових слів змістовності.

Виявлено основні ознакові характеристики текстової інформації як базове представлення при трансформації у вигляді числових розмірних характеристик. Це представлення є основою для подальших досліджень в напрямку кластеризації та класифікації тексту.

## Література

1. B. Das, S. Chakraborty. An Improved Text Sentiment Classification Model Using TF-IDF and Next Word Negation, India, 2013, pp. 1–3.

2. M. Labbé, L.I. Martínez-Merino, A.M. Rodríguez-Chía. Mixed Integer Linear Programming for Feature Selection in Support Vector Machine, Departamento de Estad´ıstica e Investigaci´on Operativa, Universidad de C´adiz, Spain, August 8, 2018, pp. 2–5.

3. B. Heap, M. Bain, W. Wobcke, A. Krzywicki, S. Schmeidl. Word Vector Enrichment of Low Frequency Words in the Bag-of-Words Model for Short Text Multi-class Classification Problems, Sydney NSW, Australia, 2017. pp. 1-2.

4. Єрмаков А.Є. Статистична модель для розпізнавання сенсів у текстах іноземною мовою з навчанням на прикладах з паралельних текстів : підручник / Єрмаков А.Є., Поляков П.Ю. – Москва, 2017. – 397 с.

5. Erica K. Shimomoto, Lincon S. Souza. Text Classification based on Word Subspace with Term-Frequency, University of Tsukuba, Japan, 2018, pp. 2–4.

6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / Прэтт У. ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1982. – С. 32–35.

### References

1. B. Das, S. Chakraborty. An Improved Text Sentiment Classification Model Using TF-IDF and Next Word Negation, India, 2013, pp. 1–3.

2. M. Labbé, L.I. Martínez-Merino, A.M. Rodríguez-Chía. Mixed Integer Linear Programming for Feature Selection in Support Vector Machine, Departamento de Estad´ıstica e Investigaci´on Operativa, Universidad de C´adiz, Spain, August 8, 2018, pp. 2–5.

3. B. Heap, M. Bain, W. Wobcke, A. Krzywicki, S. Schmeidl. Word Vector Enrichment of Low Frequency Words in the Bag-of-Words Model for Short Text Multi-class Classification Problems, Sydney NSW, Australia, 2017. pp. 1-2.

4. Yermakov A.Ye. Statistichna model dlya rozpiznavannya sensiv u tekstah inozemnoyu movoyu z navchannyam na prikladah z paralelnih tekstiv : pidruchnik / Yermakov A.Ye., Polyakov P.Yu. – Moskva, 2017. – 397 s.

5. Erica K. Shimomoto, Lincon S. Souza. Text Classification based on Word Subspace with Term-Frequency, University of Tsukuba, Japan, 2018, pp. 2–4.

6. William K. Pratt / Digital Image Processing: Translate from English. – Moscow: Mir, 1982. – pp. 32–35.

Рецензія/Peer review : 27.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-84-91
УДК 004.9

О.В. МАЗУРЕЦЬ
Хмельницький національний університет

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТВОРЕННЯ ТЕСТІВ ДО НАВЧАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У статті розглянуто інформаційну технологію автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів, яка є комплексним засобом для автоматизованого формування тестових завдань, що містить всі необхідні кроки для перетворення вхідних даних у вигляді електронного документу навчальних матеріалів у вихідні дані у вигляді множини тестових завдань та необхідних для проведення адаптивного тестування метаданих. Інформаційна технологія автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів використовує інформаційну модель семантичної структури навчального курсу. Інформаційна модель є цілісним поданням семантичної структури навчального курсу. Формалізація моделі проводиться шляхом подання частини елементів навчального курсу як множини сутностей – заголовків, слів, ключових термінів, тестових завдань, зв'язків. Це дозволяє застосовувати її для реалізації інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів і вирішенні ряду інших задач. При використанні інформаційної технології для наповнення всіх множин моделі семантичної структури навчального курсу послідовно застосовуються два методи – метод формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів й метод автоматизованої генерації прототипів тестових завдань. Оскільки правила продукції застосовуються для всіх рівнів семантичної структури навчальних матеріалів, забезпечується повне покриття начального матеріалу. Автоматизація процесу формування тестових завдань забезпечує суттєве скорочення часу на розробку тестових завдань. Дані, що містяться у моделі, дають можливість проведення адаптивного контролю рівня одержаних знань. Розглянуто відповідну прикладну програмну систему, призначену для експериментального тестування інформаційної технології, використання якої підтвердило можливість автоматизованого створення тестових завдань різних типів за вхідним контентом навчального матеріалу.*

*Ключові слова: тестові завдання, тести, тестування, навчальні матеріали, ключові терміни.*

O. MAZURETS
Khmelnytskyi National University

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR AUTOMATED TEST CREATION FOR EDUCATIONAL MATERIALS

*The article considers the information technology for automated creation of tests for educational materials, which is a complex means for automated creation of test tasks, which contains all necessary steps for the transformation of input data in the form of an electronic document of educational materials into output data in the form of a set of test tasks and necessary for conducting adaptive testing metadata. Informational technology for automated test creation for educational materials uses the information model of the semantic structure of the educational course. The information model is a coherent representation of the semantic structure of the educational course. Formalization of the model is carried out by presenting some of the elements of the educational course as a set of entities – headings, words, key terms, test tasks and relations. This allows it to be used to implement the information technology of automated test creation into educational materials and to solve a number of other tasks. With the use of information technology to fill all the sets of the model of the semantic structure of educational course, two methods are used consistently: the method of forming the structure of educational materials and of key terms search and the method of automated generation of prototypes of test tasks. Since the product rules are applied to all levels of the semantic structure of educational materials, full coverage of the educational material is provided. Automation of the process of formation of test tasks provides a significant reduction of time for the development of test tasks. The data contained in the model provide an opportunity for adaptive control of the level of knowledge gained. The corresponding application program system for experimental testing of information technology is considered, the use of which has confirmed the possibility of automated creation of test tasks of various types according to the input content of the educational material.*

*Keywords: test tasks, tests, testing, educational materials, key terms.*

### Постановка проблеми в загальному вигляді

До навчального курсу дисципліни в більшості випадків включається інформаційний навчальний матеріал (формується у вигляді підручника, навчального посібника чи конспекту лекцій) як основний носій інформації в навчальному курсі й тестовий навчальний матеріал (множина тестових завдань) як найбільш розповсюджений різновид діагностуючого навчального матеріалу, призначений для визначення рівня засвоєння інформаційного навчального матеріалу [1]. Тестовий навчальний матеріал містить тестові завдання різної складності, які дозволяють оцінити рівень засвоєнні інформаційного навчального матеріалу, виявити прогалини в знаннях, причини неправильних дій суб'єкта, що вивчає навчальний курс.

В умовах вузької спеціалізації курсів навчальних дисциплін, їх чисельності та інтенсивного оновлення, єдиним шляхом забезпечення курсів навчальних дисциплін репрезентативним та дискримінативним тестовим діагностичним матеріалом є автоматизація формування множин тестових завдань.

### Аналіз останніх досліджень

Різноманітним аспектам тестування, розробки та застосування навчальних і тестувальних середовищ на основі сучасних інформаційних технологій, питанням розробки баз даних і знань програмних систем перевірки рівня знань присвячені праці українських і закордонних авторів, зокрема Аванесова В. С., Снитюка В. Е., Титенка С. В., Пасічника В. В., Пасічника Р. М., Тонконогого В. М., Башмакова І. А., Клайна

П., Гагаріна О. О., Мельника А. М.. Танченко С. С. Дослідження проводились переважно в сфері проведення тестувань, наповнення бази тестових завдань за допомогою засобів підтримки ручного створення тестових завдань, безпеки процесу тестування і відтворення результатів.

Серед відомих методів автоматизованого формування тестових завдань можна відзначити: параметризовані тести, метод семантичних мереж, реляційний підхід, використання понятійно-тезисної моделі [2–5]. Наведені методи є ефективними для використання у визначених випадках, проте вимагають суттєвої і трудомісткої попередньої підготовки інформаційного навчального матеріалу. В умовах чисельності та інтенсивного оновлення курсів навчальних дисциплін це є складною задачею, проте в деяких випадках, наприклад формуванні математичних задачах для методу параметризованих тестів, безальтернативною. Втім, значна частина контенту інформаційного навчального матеріалу багатьох курсів навчальних дисциплін містить переважно текстовий контент, який характеризується послідовністю й семантичною зв'язністю подання. Ця ознака відриває шлях до розробки методу автоматизованого формування тестових завдань, який не вимагає суттєвої попередньої обробки інформаційного навчального матеріалу.

Пропонується інформаційна технологія автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів як комплексний інструмент для автоматизованого формування тестових завдань, що містить всі необхідні кроки для перетворення вхідних даних у вигляді електронного документу навчальних матеріалів у вихідні дані у вигляді множини тестових завдань та необхідних для проведення адаптивного тестування метаданих. У попередніх публікаціях авторами було розглянуто складові інформаційної технології та супровідних досліджень. Розроблено інформаційну модель семантичної структури навчального курсу [6], яка є формальним поданням інформаційного та тестового навчальних матеріалів навчального курсу дисципліни й призначена для використання при реалізації відповідних прикладних програмних систем, дозволяючи проводити автоматизоване формування наборів тестових завдань, забезпечуючи максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу. Запропоновано підходи до програмного аналізу структури інформаційних навчальних матеріалів [7], до формування моделі структури інформаційних навчальних матеріалів [8]. Визначено переваги використання алгоритму, що базується на дисперсійному аналізі електронних текстів [9], для оцінки семантичної важливості слів у контенті інформаційних навчальних матеріалів [10]. Розроблено метод автоматизованого формування сортованих множин ключових термінів інформаційних навчальних матеріалів [11]. Запропоновано підхід до формування наборів тестових завдань за допомогою системи правил продукції для перетворення текстового контенту інформаційних навчальних матеріалів [12].

**Постановка задачі**

Метою роботи є розробка інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів, яка дозволяє за вхідними даними навчальних матеріалів курсу автоматизовано одержувати множину тестових завдань шляхом наповнення параметрів інформаційної моделі семантичної структури навчального курсу за допомогою методів формування структури навчальних матеріалів і пошуку у них ключових термінів та автоматизованого формування тестових завдань. Важливими рисами даної технології визначено прив'язку створених тестових завдань до всіх рівнів семантичної структури навчальних матеріалів, що забезпечує повне покриття начального матеріалу та надає можливість проведення адаптивного контролю рівня одержаних знань.

**Викладення основних матеріалів дослідження**

Інформаційна технологія автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів використовує інформаційну модель семантичної структури навчального курсу. Інформаційна модель семантичної структури навчального курсу є цілісним поданням семантичної структури навчального курсу, формалізація моделі проводиться шляхом подання частини елементів навчального курсу як множини сутностей (заголовків, слів, ключових термінів, тестових завдань, зв'язків). Це дозволяє застосовувати її для реалізації інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів і вирішенні ряду інших задач. При використанні інформаційної технології для наповнення всіх множин моделі семантичної структури навчального курсу застосовуються два методи – метод формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів [11] й метод автоматизованої генерації прототипів тестових завдань (рис. 1) [12].

Модель семантичної структури навчального курсу навчальної дисципліни містить наступні складові [6]: множину заголовків $M_{Heading}$, множину термінів $M_{Term}$, множину слів $M_{Word}$, множину тестових завдань $M_{TestEx}$, множину зв'язків $M_{Rel}$. При цьому, визначено наступні підмножини множини зв'язків $M_{Rel}$: між заголовками та заголовками $M_{Rel:H-H}$, між заголовками та ключовими термінами $M_{Rel:H-T}$, між ключовими термінами та словами $M_{Rel:T-W}$, між заголовками та тестовими завданнями $M_{Rel:H-TE}$, між ключовими термінами та тестовими завданнями $M_{Rel:T-TE}$.

В межах інформаційної технології застосування наведених методів відбувається послідовно, що визначає схему інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів, яку подано на рис/ 2.

*Вхідними даними* інформаційної технології є файл електронного документу з контентом навчальних матеріалів, наприклад, формату .docx. Файл має містити слабо структурований текстовий контент, для рубрикації бажане використання заголовків, які визначають структуру текстового контенту. Ніякої

спеціальної попередньої обробки вхідних даних не вимагається, втім підвищення рівня виконання вимог роботи з електронними документами (використання стилів) та вимог до роботи з навчальними матеріалами (коректність використання скорочень, рубрикації тощо) може відповідно підвищити якість вихідних даних інформаційної технології.

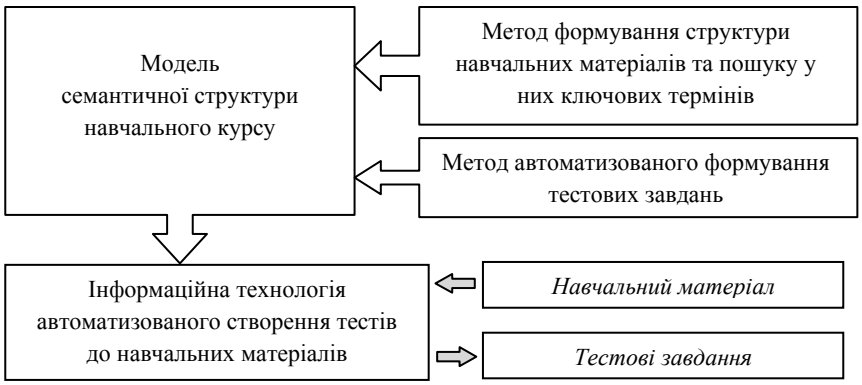



**Рис. 1. Загальна схема застосування методів при використанні інформаційної технології**

*Метод формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів* є першим етапом роботи інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів. Результатом його роботи є формування частини моделі семантичної структури навчального курсу, яка стосується навчальних матеріалів, а саме верхнього рівня структури навчальних матеріалів у вигляді рубрикації (структури заголовків) та нижнього рівня структури навчальних матеріалів у вигляді окремих впорядкованих за важливістю множин ключових термінів для кожного з елементів верхнього рівня структури навчальних матеріалів.

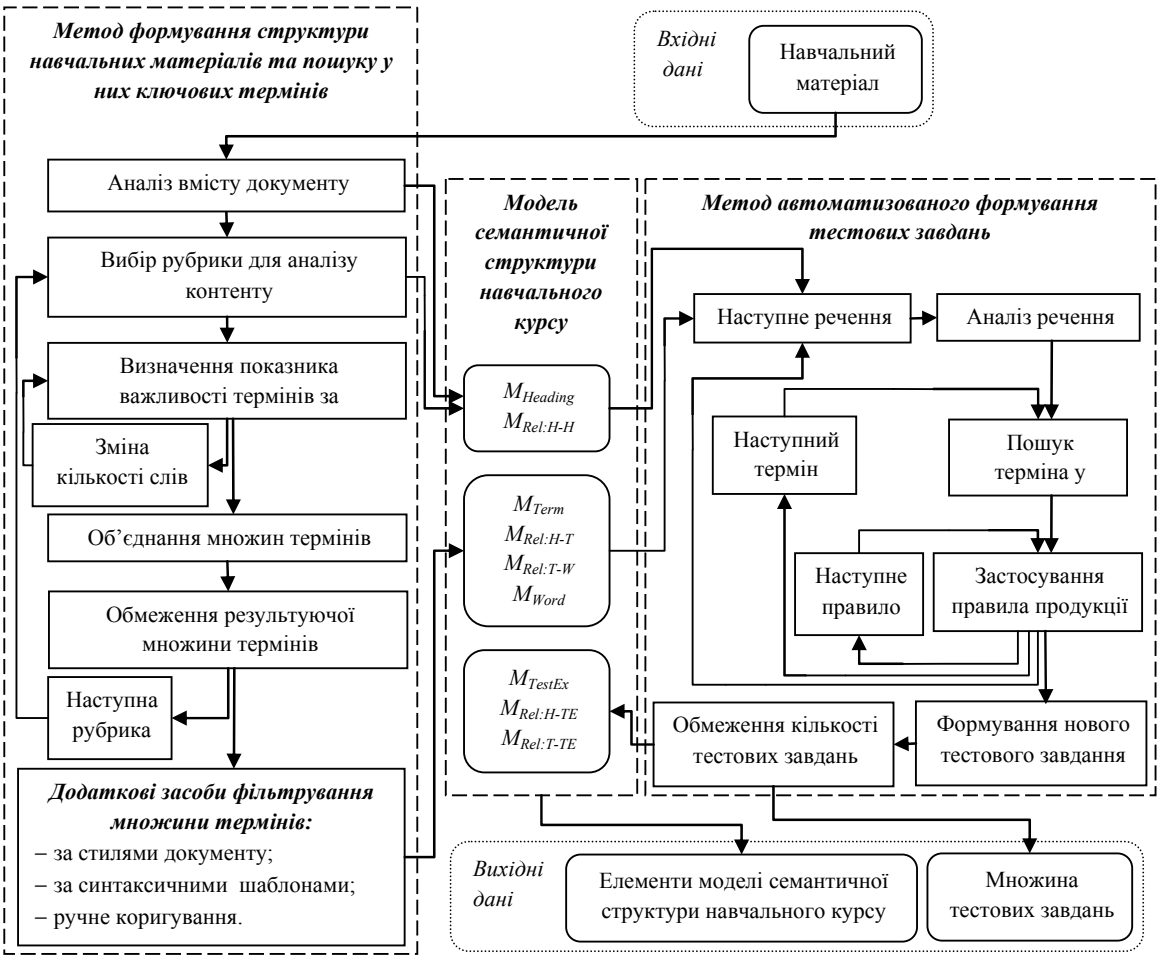



**Рис. 2. Схема інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів**

При аналізі вмісту документу обробляється контент документу для визначення стилів його складових. Відповідно до них, формується структура заголовків, одним з атрибутів кожного з яких є приналежний йому обсяг контенту документу. В подальшому обробка контенту кожного з одержаних

елементів відбувається окремо і незалежно. При цьому контент підлеглого елементу одночасно входить до складу контенту елемента-батька в ієрархічній структурі заголовків.

Наступним кроком для кожного елемента в структурі навчальних матеріалів проводиться аналіз контенту для пошуку ключових термінів із використанням методу дисперсійного оцінювання. При цьому терміни-кандидати обираються в межах фраз, а пошук виконується окремо для термінів різної розмірності. Під фразою мається на увазі текстовий контейнер, обмежений єдиним стилістичним оформленням та знаками пунктуації. Розмірність терміну є кількістю слів, що входять до його складу. Дисперсійна оцінка терміну розглядається як показник його важливості. За результатами визначення показників важливості термінів за дисперсійною оцінкою одержуються окремі множини термінів, які об'єднуються, при цьому відбувається поглинання термінів, що є частинами термінів більшої розмірності. Одержана множина термінів сортується за значенням важливості терміна обмежується за встановленим показника щільності ключових термінів у відповідному контенті.

Результат роботи цього етапу не прив'язаний до певної мови й на оцінку важливості терміну не впливають стильові ознаки в контенті. Втім, передбачена необов'язкова можливість коригування одержаних множин ключових термінів, що може підвищити якість вихідних даних:

шляхом перевизначення показника важливості терміну за стилями документу, наприклад при виділенні в контенті терміну жирним, курсивом чи в складі заголовку;

шляхом фільтрування за синтаксичними шаблонами, наприклад якщо термін є одним словом то згідно проведених досліджень він може бути тільки іменником;

видаленням деяких термінів вручну у випадках, коли попри їх важливість контенті користувач не вважає їх вивчення метою даного фрагменту навчальних матеріалів.

За результатом використання методу формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів забезпечується наповнення відповідних множин семантичної структури навчального курсу: множини заголовків, множини ключових термінів, множини слів, множини зв'язків між заголовками і заголовками, множини зв'язків між термінами і словами, множини зв'язків між заголовками і термінами.

З цього переліку, частина вихідних даних виконання методу формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів є вхідними даними для методу автоматизованого формування тестових завдань в межах інформаційної технології, а саме: множина заголовків, множина ключових термінів, множина зв'язків між заголовками і заголовками, множина зв'язків між заголовками і термінами.

*Метод автоматизованого формування тестових завдань* є другим етапом роботи інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів. Результатом його роботи є формування частини моделі семантичної структури навчального курсу, яка стосується тестових завдань, а саме множини тестових завдань та зв'язків кожного тестового завдання як із елементом структури навчальних матеріалів, на основі якого й для перевірки якого створене тестове завдання, так і з ключовим терміном, рівень засвоєння якого тестового завдання перевіряє.

Обробка контенту кожного з елементів структури навчальних матеріалів для створення тестових завдань відбувається окремо і незалежно. Інструментом автоматизованого створення тестових завдань слугує множина правил продукції тестових завдань, кожне з яких містить умову, яка визначає придатність обраного речення для створення тестового завдання до обраного терміну, та наслідок, який визначає алгоритм перетворення контенту речення у відповідне тестове завдання.

Кожне речення контенту обраного елементу структури навчальних матеріалів перевіряється на наявність кожного ключового терміну, що визначений як ключовий у цьому елементі структури навчальних матеріалів. Якщо термін використовується в реченні, то проводиться перебір правил продукції для визначення відповідності умов правил. Кожен випадок відповідності має наслідком автоматичне створення нового тестового завдання.

У випадку, коли метою застосування інформаційної технології є не максимізація кількості тестових завдань у вихідній множині, а й їх рівномірний розподіл за визначеними параметрами (тип запитання, термін який перевіряється, елемент структури навчальних матеріалів тощо), передбачена необов'язкова можливість коригування загальної кількості тестових завдань шляхом видалення частини з них за категоріями, де їх кількість більша від середньої.

За результатом використання методу автоматизованого формування тестових завдань забезпечується наповнення відповідних множин семантичної структури навчального курсу: множини тестових завдань, множини зв'язків між ключовими термінами і тестовими завданнями, множини зв'язків між заголовками і тестовими завданнями.

*Вихідними даними* інформаційної технології є множина тестових завдань. Ця множина може бути подана в потрібному користувачеві вигляді, наприклад в форматі .xml чи .gift для подальшого використання в середовищі Moodle.

Також *вихідними даними* інформаційної технології є семантична структура навчального курсу, надана у вигляді ряду множин, яка може бути використана для допомоги при практичному використанні сформованої множини тестових завдань, зокрема для забезпечення адаптивного тестування. Іншими напрямками використання одержаних вихідних даних є автоматизоване вирішення ряду задач – визначення відповідності навчальних матеріалів вимогам, допомога при розробці навчальних матеріалів, оцінка відповідності наборів тестових завдань інформаційним навчальним матеріалам, допомога при створенні тестів тощо.

**Прикладна реалізація інформаційної технології**

Для експериментального тестування інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань до навчальних матеріалів було розроблено відповідну прикладну програмну систему. За результатами її використання для вирішення задач формування структури навчальних матеріалів, пошуку в них ключових термінів та автоматизованого формування тестових завдань можна визначити ефективність відповідної інформаційної технології.

Розв'язок задачі автоматизації формування тестових завдань та їх використання містить ряд послідовних етапів перетворення даних, до яких можна віднести: визначення структури й семантичних термінів у контенті навчальних матеріалів шляхом застосування методу формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів; власне формування тестових завдань шляхом застосування методу автоматизованого формування тестових завдань; перенесення результатів в область взаємодії з кінцевим користувачем – окремого програмного продукту чи підсистеми тестування віртуального навчального середовища. Кожному етапу з наведених відповідає деяка послідовність перетворення даних за допомогою відповідного програмного забезпечення, що деталізує цей перелік й визначає програмні компоненти, які приймають в цьому участь. На рисунку 3 подано відповідну схему розподілу функцій за програмними компонентами.

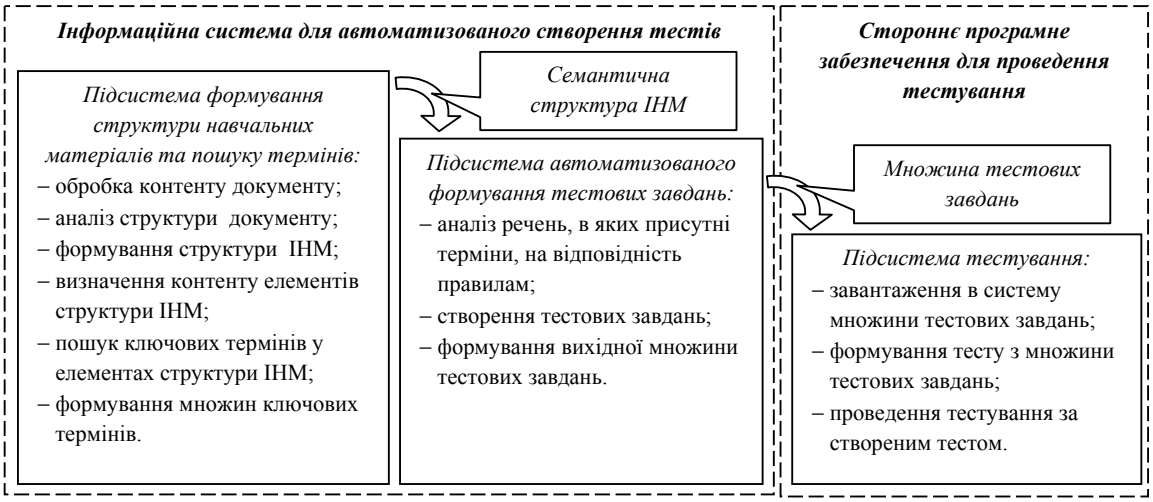



**Рис. 3. Схема розподілу функцій за компонентами системи**

Окремою функцію можна визначити інструментарій додавання правил продукції тестових завдань до банку правил (бази знань), але оскільки правила продукції можуть бути реалізовані на програмному рівні без втрати функціональності, цю функцію віднесено до внутрішнього програмного інструментарію програмної системи.

Розробка програмних системи, що за допомогою відомих алгоритмів реалізують процес тестування (завантаження в систему множини тестових завдань, формування тесту з множини тестових завдань, проведення тестування за створеним тестом), виходить за межі даної роботи. Для перевірки працездатності створених множини тестових завдань було використано середовище Moodle. При цьому вихідні дані інформаційної системи для автоматизованого створення тестів є вичерпними для подальшого їх використання сторонніми системами тестування.

Відповідно до використовуваних методів при роботі програмної системи (метод формування структури навчальних матеріалів та пошуку у них ключових термінів й метод автоматизованого формування тестових завдань), що формують групи функцій інформаційної системи для автоматизованого створення тестів, визначено дві її відповідні підсистеми: підсистему формування структури навчальних матеріалів та пошуку ключових термінів й підсистему автоматизованого формування тестових завдань.

Підсистема формування структури навчальних матеріалів та пошуку ключових термінів (рис. 4) виконує функції обробки контенту вхідного документу, аналізу структури документу, формування структури навчальних матеріалів визначення контенту елементів структури навчальних матеріалів, пошуку ключових термінів у елементах структури навчальних матеріалів та формування множин ключових термінів.

Підсистема автоматизованого формування тестових завдань (рис. 5) виконує функції аналізу речень, в яких присутні терміни, на відповідність правилам автоматизованого створення тестових завдань та формування вихідної множини тестових завдань.

Обов'язковою функцією користувача системи автоматизованого створення тестів є вибір файлу документу навчальних матеріалів для обробки. Подальші кроки, що приводять до формування множини тестових завдань, система здатна виконувати самостійно. Решта функцій користувача є необов'язковими (для покращення результату роботи системи) або спостережними (для розуміння процесу одержання конкретних вихідних даних).

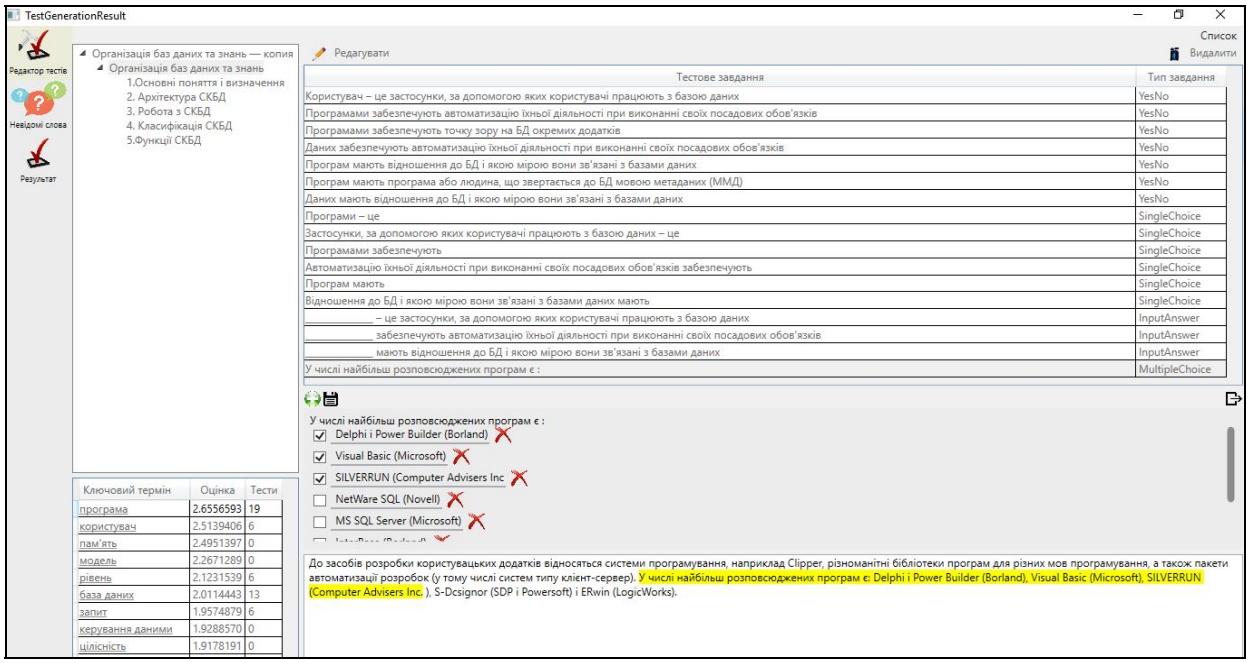



**Рис. 4. Побудова структури навчальних матеріалів підсистемою формування структури навчальних матеріалів та пошуку ключових термінів**

**Рис. 5. Перегляд створених тестових завдань у підсистемі автоматизованого формування тестових завдань**

## Дослідження ефективності інформаційної технології

Було досліджено ефективність використання прикладною програмною системою правил продукції завдань різних типів з використанням контенту різного наповнення. Зведені результати кількості сформованих завдань різного типу на базі 10 навчальних матеріалів наведені у таблиці 1, яка зазначає загальну, середню, мінімальну та максимальну кількість сформованих тестових завдань даного типу. Для типів завдань одиничного вибору спостерігаються наступні значення кількості сформованих тестів: загальна кількість – 202, середня кількість – 20, мінімальна – 9 та максимальна – 31. У той час як для тестових завдань множинного вибору актуальними є наступні значення: загальна кількість – 92, середня кількість – 9, мінімальна – 0 та максимальна – 17.

На базі наведеної таблиці кількості сформованих завдань різних типів сформовано діаграму залежності середньої кількості автоматизовано створених тестових завдань від їх типів (рис. 6). Дослідження результатів апробування свідчать про значну перевагу тестових завдань одиночного вибору. Тестові завдання множинного вибору формуються у значно менших кількостях, що є закономірно, оскільки моделі формування тестових завдань множинного вибору мають менший набір антецедентів для ідентифікації контенту.

Таблиця 1

**Зведені результати автоматизованого формування тестових завдань за типами**

| Кількість створених тестових завдань | Типи тестових завдань | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *логічного типу* | *одиничного вибору* | *множинного вибору* | *із введенням тексту* |
| Загалом | 113 | 202 | 92 | 112 |
| Середнє | 11 | 20 | 9 | 11 |
| Мінімальне | 3 | 9 | 0 | 7 |
| Максимальне | 20 | 31 | 17 | 9 |

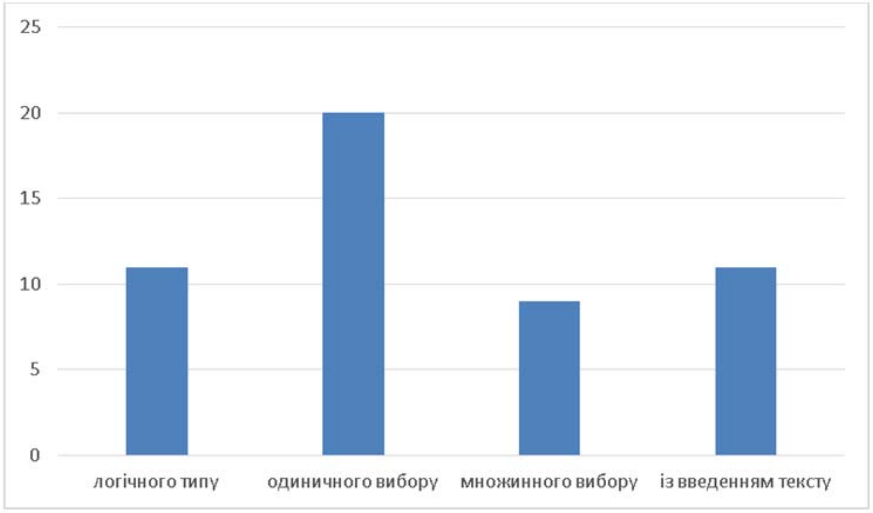



**Рис. 6. Діаграма залежності середньої кількості автоматизовано створених тестових завдань від їх типів**

Завдання логічного типу та завдання, які передбачають введення тексту, мають приблизно однакові показники, що можна пояснити тим, що відповідні правила продукції тестових завдань використовують однакові антецеденти для ідентифікації контенту. Для зменшення надмірної частки тестових завдань одиночного вибору достатньо збільшити кількість продукційних правил для інших типів тестових завдань, що забезпечить більш широке покриття антецедентами продукційних правил фрагментів тексту з використанням термінів. Загалом, дослідження результатів формування тестових завдань підтвердили можливість автоматизованого створення тестових завдань різних типів. Для зменшення диспропорцій (за типом, цільовим терміном, використаним реченням, використаним правилом продукції) передбачено можливість зменшення загальної кількості створених тестових завдань за рахунок тих, що належать категоріям із надмірними показниками кількості.

**Дискусія**

Застосований в інформаційній технології метод автоматизованого формування тестових завдань, не втрачаючи переваг ручного методу (контроль рівномірності покриття контенту навчальних матеріалів, контроль повноти уваги до семантичних термінів, контроль рівномірності уваги до семантичних термінів, можливість використання тесту для адаптивного тестування), зберігає переваги існуючих методів формування тестових завдань (низькі трудозатрати для підготовки контенту навчальних матеріалів та висока швидкість формування множини тестових завдань).

Також можна відзначити наступні властивості розробленої інформаційної технології:

оскільки правила продукції застосовуються для всіх рівнів семантичної структури навчальних матеріалів, забезпечується повне покриття начального матеріалу;

автоматизація процесу формування тестових завдань забезпечує суттєве скорочення часу на розробку тестових завдань;

дані, що містяться у моделі (заголовки, терміни, тестові завдання, зв'язки) дають можливість проведення адаптивного контролю рівня одержаних знань.

**Висновки**

В статті розглянуто інформаційну технологію автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів, яка дозволяє за вхідними даними навчальних матеріалів курсу автоматизовано одержувати множину тестових завдань. Використання інформаційної технології здійснюється шляхом наповнення параметрів інформаційної моделі семантичної структури навчального курсу за допомогою методу формування структури навчальних матеріалів і пошуку у них ключових термінів та методу автоматизованого формування тестових завдань. Розглянуто відповідну прикладну програмну систему, призначену для експериментального тестування інформаційної технології, використання якої підтвердило можливість автоматизованого створення тестових завдань різних типів за вхідним контентом навчального матеріалу.

Важливою рисою розробленої інформаційної технології є прив'язка створених тестових завдань до всіх рівнів семантичної структури навчальних матеріалів, що забезпечує повне покриття начального матеріалу та надає можливість проведення адаптивного контролю рівня одержаних знань.

Література

1. Снитюк В. Е. Інтелектуальне управління оцінюванням знань / В. Е. Снитюк, К. Н. Юрченко. − Черкассы, 2013. – 262 с.

2. Титенко С. В. Автоматизации построения тестовых заданий в системах дистанционного обучения на основе понятийно-тезисной модели / С. В. Титенко // Educational Technology & Society. – 2013. – 16 (1). – С. 482–499.

3. Pathak S., Brusilovsky P. Assessing Student Programming Knowledge with Webbased Dynamic Parameterized Quizzes. In Barker P and Rebelsky S (eds) ED-MEDIA'2002 - World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications, Denver, CO, June 24–29, 2002, pp. 1548–1553.

4. Melnyk A. System of semantic classes for test's generation / A. Melnyk, R. Pasichnyk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the International Conference. TCSET'2010. – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2010. – P. 206–207.

5. Кліменко В. І. Аналіз сучасних методів генерації тестових завдань / В. І. Кліменко, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами десятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2016». – Хмельницький, 2016. – С. 77–84.

6. Бармак О. В. Інформаційна модель семантичної структури навчального курсу / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6, Т. 1. – С. 92–97.

7. Мазурець О. В. Використання спеціалізованих програмних розширень для автоматизації роботи з цифровими документами навчальних матеріалів / О. В. Мазурець, О. В. Ковальчук, В. О. Слободзян // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 1. – С. 61–69.

8. Мазурець О. В. Онтологічний підхід до побудови семантичної моделі навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 6. – С. 223–229.

9. Ландэ Д. В. Компактифицированный горизонтальный граф видимости для сети слов / Д. В. Ландэ, А. А. Снарский // Труды Международной научной конференции «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2013. Знания и рассуждения». – Киев : КПИ, 2013. – С. 158–164.

10. Бармак О. В. Методи автоматизації визначення семантичних термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Сер.: Технічні науки. – 2015. – № 2(223). – С. 209–213.

11. Мазурець О. В. Інформаційна технологія автоматизованого визначення семантичних термінів в елементах навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 3. – С. 223–230.

12. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого формування тестових завдань / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, В. І. Кліменко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 5. – С. 93–103.

**References**

1. Snytyuk, V. E. & Yurchenko K. N. (2013) Intelligent Management of Knowledge Assessment. Cherkassy.

2. Titenko, S. V. (2013) Avtomatizatsii Postroyeniya Testovykh Zadaniy v Sistemakh Distantsionnogo Obucheniya na Osnove Ponyatiyno-Tezisnoy Modeli. Educational Technology & Society. Issue 16, 2013.

3. Pathak, S., Brusilovsky, P. (2002) Assessing Student Programming Knowledge with Webbased Dynamic Parameterized Quizzes // World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications ED-MEDIA'2002. Denver, CO. p. 1548-1553.

4. Melnyk, A. (2010) System of Semantic Classes for Test's Generation. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the International Conference. TCSET'2010. Lviv-Slavsko, Ukraine. p. 206-207.

5. Klimenko, V. I. & Mazurets, O. V. (2016) Analysis Of Modern Methods For Generation Of Test Tasks // Collection of scientific works on the materials of the X$^{th}$ international scientific and technical conference "Actual Problems of Computer Technologies 2016". p. 77-84.

6. Barmak, O. V. & Mazurets, O. V. (2018) Information Model of The Semantic Structure of the Educational Course // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 6, Vol.1, 2018 (267). p. 92-97.

7. Mazurets, O. V., Kovalchyk, O. V. & Slobodzian, V.O. (2018) Using Specialized Software Packeges for Automation of Work with Digital Documents of Educational Materials // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 1, 2018 (257). p. 61-69.

8. Mazurets, O. V. (2017) Ontological Approach to Building a Semantic Model of Educational Materials. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 6, 2017 (255). p. 223-229.

9. Lande, D. V. & Snarskiy, A. A. (2013) Kompaktificirovanniy Gorizontalniy Graf Vidimosti dlya Seti Slov. Trudi Mejdunarodnoy Nauchnoy Konferencii «Intellektualniy Analiz Informacii IAI-2013. Znania I Rassujdenia». p 158-164.

10. Barmak, O. V. & Mazurets, O. V. (2015) Methods of Automation of Definition of Semantic Terms in Educational Materials // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 2, 2015 (223). p. 209-213.

11. Mazurets, O. V. (2018) Information Technology for Automated Definition of Semantic Terms in the Content of the Elements of Educational Materials. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 3, 2018. p. 223-230.

12. Barmak, O. V., Mazurets, O. V. & Klimenko, V. I. (2017) Information Technology of Automated Creation of Test Tasks // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 5, 2017 (253). p. 93-103.

Рецензія/Peer review : 21.5.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р. В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-92-96
УДК 004.891

О.В. ОГНЄВИЙ, Л.Л. СИЧ
Хмельницький національний університет

# МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДОСТУПУ ДО ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ СИСТЕМ ВІДЕОКОНФЕРЕНЦЗВ'ЯЗКУ

*В роботі запропоновано актуальний метод обробки інформації, який, шляхом виділення привілейованого трафіку і оптимізації потоків інформації, дозволяє підвищити надійність системи відеоконференцзв'язку для авторизованих користувачів з гарантованою доставкою повідомлень і підвищити ймовірність отримання доступу до ресурсів систем відеоконференцзв'язку. Розроблено новий алгоритм управління доступом до інформаційних ресурсів, заснований на додаванні міток привілеїв в службове поле пакету і зміни маршруту передачі пакетів, що дозволяє підвищити надійність відеоконференцзв'язку для авторизованих користувачів з гарантованою доставкою повідомлень шляхом підвищення ймовірності отримання доступу до інформаційних ресурсів до заданого значення. На сьогоднішній день технологія відеоконференцзв'язку активно розвивається, це пов'язано в основному з впливом процесів глобалізації, розвитком міжнародних відносин у суспільстві. Використання виключно голосового зв'язку не дозволяє отримати такий же обсяг інформації, який стає доступним з використанням. Також сучасні технології дозволяють задіяти при спілкуванні візуальні графічні матеріали: малюнки, таблиці, схеми і діаграми. У сучасних дослідженнях практично не розглядається задача одночасного розділення користувачів на класи з одночасним розподілом навантаження для привілейованих користувачів. В інших методах підвищення надійності традиційно найважливішим критерієм виступають використовувані технології, в тому числі вид мережевого обладнання, а пропоновані рішення часто засновані на використанні специфічних протоколів. Застосування рішення на практиці дозволить організувати надійне з'єднання учасників відеоконференцзв'язку.*

*Ключові слова: інформаційний трафік, оптимізація потоків, передача пакетів, інформаційна безпека.*

O.V. OHNIEVYI, L.L. SYCH
Khmelnytsky National University

## METHOD OF INCREASING RELIABILITY ACCESS TO INFORMATION RECOURSES VIDEOCONFERENCING SYSTEMS

*The article proposes an actual method of information processing. By allocating privileged traffic and streamlining information flows, it can increase the reliability of the video conferencing system for authorized users with guaranteed delivery of messages. Also, the method can increase the likelihood of access to resources of video conferencing systems. A new algorithm for access control to information resources has been developed. It is based on the addition of privilege labels in the service field of the packet and the change of the data transmission path, which increases the reliability of video conferencing for authorized users with guaranteed delivery of messages by increasing the likelihood of access to information resources. Today, videoconferencing technology is actively developing. This is mainly due to the following: the influence of the processes of globalization, the development of international relations in society. Therefore, there is a need for operative communication around the world. The use of voice communication alone does not allow for the same amount of information that becomes available through videoconferencing. Also, modern technology allows you to engage in communication visual graphic materials such as: drawings, tables, schematics and diagrams. Increasing the bandwidth of the transmission channels made video conferencing a convenient means of communication. Video conferencing sessions are held to exchange experience among professionals, organize corporate meetings, and videoconferencing is widely used for educational purposes. The transmission of information flows during videoconferences is most often carried out on open telecommunication networks using standard protocols. The method of improving the reliability of video conferencing systems is needed to minimize the likelihood of a threat of integrity and availability. In modern research, the task of simultaneously dividing users into classes with simultaneous distribution of load for privileged users is practically not considered. In other methods of increasing the reliability of traditionally the most important criterion are the technologies used. Including the kind of network equipment, and the proposed solutions are often based on the use of specific protocols. Application of the decision in practice will allow to organize a reliable connection of participants of video conferencing.*

*Key words: information traffic, flow optimization, packet transmission, information security.*

## Вступ

На сьогоднішній день технологія відеоконференцзв'язку активно розвивається, це пов'язано в основному з впливом процесів глобалізації, розвитком міжнародних відносин у суспільстві і, як наслідок, з необхідністю оперативного зв'язку по всьому світу. Використання виключно голосового зв'язку не дозволяє отримати такий же обсяг інформації, який стає доступним з використанням відеоконференцзв'язку дуже важливі вираз обличчя, міміка співрозмовника. Також сучасні технології дозволяють задіяти при спілкуванні візуальні графічні матеріали: малюнки, таблиці, схеми і діаграми.

Збільшення пропускної здатності каналів передачі інформації зробило відеоконференцзв'язок зручним засобом спілкування: сеанси проводяться для обміну досвідом між фахівцями, організації корпоративних нарад, також відеоконференцзв'язок широко використовується в освітніх цілях.

В основному технології відеоконференцзв'язку знаходять застосування в наступних областях:

виробничі завдання (бізнес переговори, спільні проекти);

освіта (дистанційне навчання, конференції, майстер-класи та семінари);

особисті потреби людей (спілкування з родичами і друзями).

Відеоконференцзв'язок (ВКЗ) – це телекомунікаційна технологія інтерактивної участі двох і більше віддалених абонентів, при якому між ними відбувається обмін аудіо та відеоінформацією в режимі

реального часу. Історія розвитку відеоконференцзв'язку починається з того моменту, коли компанія «AT&T» представила в 1964 році Videophone – першу аудіовізуальну систему електронної взаємодії, яка призначалася для взаємодії двох осіб в режимі реального часу. Початок поширення ВКЗ відноситься до 80-х років – від телевізійних систем, що забезпечують інтерактивні контакти між віддаленими партнерами. За наступні п'ятдесят з гаком років системи ВКЗ зазнали значних змін, незмінним залишилося те, що співрозмовники бачать один одного у себе на екрані.

Систему відеоконференцзв'язку прийнято вважати сукупністю трьох функціональних елементів: кінцевих вузлів системи – серверів і клієнтів відеоконференцій, а також каналів зв'язку, що з'єднують ці вузли. Під сервером відеоконференції розуміється комплекс програмно-технічних засобів і систем, забезпечує управління відеоконференцією, виконання функції ідентифікації та аутентифікації клієнтів, приймання, обробки і перенаправлення даних відеоконференцій. Сервер є вузлом на стороні адміністратора відеоконференції. Клієнти також являють собою комплекс програмного і апаратного забезпечення і є джерелом даних системи. Зв'язок клієнтів відбувається тільки через сервера за допомогою канал зв'язку. Під каналом зв'язку прийнято розуміти всі безліч ліній зв'язку і засобів передачі даних, що беруть участь в процесі відеоконференції. Без втрати спільності міркувань, структуру каналу зв'язку за «останньою милею» можна вважати тривіальною. У цьому контексті провайдер послуг зв'язку вважається складовою частиною каналу зв'язку.

Як було сказано вище, проведення відеоконференцій стало невід'ємною частиною нашого життя, проте, з появою технології відеоконференцзв'язку виникли і певні проблеми з надійністю передачі даних. Багато відеоконференцій призначені для вузького кола осіб, що передбачає необхідність організації захищеного доступу до відео даних, що виключає можливість несанкціонованого доступу неавторизованих користувачів для підтримки надійності відеоконференцзв'язку.

Системи відеоконференцзв'язку активно використовуються для роботи над спільними проектами, в тому числі в ракетно-космічній галузі для організації зв'язку між віддаленими майданчиками. Відео-трафік має певні особливості: вимагає значної пропускної здатності каналу, мінімізації часу доставки відеокадрів до одержувача, регулярного характеру затримок між повідомленнями (пакетами). У сферах застосування систем відеоконференцзв'язку, пов'язаних з точними операціями, важливо підтримувати заданий рівень надійності.

Транспорт інформаційних потоків при проведенні відеоконференцій найчастіше здійснюється по відкритим телекомунікаційним мережам з використанням стандартних протоколів, тому дослідження проблем забезпечення інформаційної безпеки відеоконференцій набувають особливої актуальності. Для мінімізації ймовірності виникнення загроз цілісності та доступності потрібен комп'ютерний метод підвищення надійності систем відеоконференцзв'язку.

Одним з перспективних рішень проблеми забезпечення надійності систем відеоконференцзв'язку на сьогоднішній день є використання технологій розподілу навантаження мережі. Оптимальний розподіл навантаження дозволяє забезпечувати задані характеристики відеоконференцзв'язку за рахунок управління інформаційними потоками.

В якості критерію надійності систем відеоконференцзв'язку раніше не розглядалася ймовірність отримання доступу до різних ресурсів систем відеоконференцзв'язку.

**Постановка задачі**

В результаті проведеного дослідження відмічено, що для розподілених обчислювальних систем, до яких можна віднести системи відеоконференцзв'язку, функціональна надійність і відмовостійкість може забезпечуватися перерозподілом запитів між вузлами кластера. Незважаючи на те, що перерозподіл вносить додаткову затримку, ступінь адаптації системи до зміни потоку запитів збільшується, що призводить до зменшення відмов.

На сьогоднішній день відсутня ймовірнісна модель доступу до систем відеоконференцзв'язку з гарантованою доставкою для авторизованих користувачів. Моделі доступу інших авторів в основному орієнтовані на підтримку конфіденційності, а не цілісності та доступності. Існуючі ймовірнісні моделі традиційно використовують в якості критерію надійності коефіцієнт готовності, що визначає працездатність системи, а не цілісність і доступність її ресурсів. В якості критерію надійності систем відеоконференцзв'язку раніше авторами не розглядалася ймовірність отримання доступу до ресурсів систем відеоконференцзв'язку. Існуючі ймовірнісні моделі доступу зазвичай не враховують характерні особливості систем відеоконференцзв'язку або прив'язані до конкретних технологій, наприклад, бездротовий відеоконференцзв'язок, що звужує їх область застосування.

**Основна частина**

В ході досліджень була запропонована ймовірнісна модель доступу до системам відеоконференцзв'язку, придатна для оцінки надійності таких систем.

Розроблена модель дозволяє описати різні системи відеоконференцзв'язку і враховує їх характерні особливості.

Значення ймовірності отримання доступу може бути розраховане на основі апарату марківських випадкових процесів з дискретними станами і безперервним часом.

Ймовірнісна модель доступу верхнього рівня, запропонована в роботі, заснована на поняттях: суб'єкти, об'єкти, дії. Для кожного об'єкта доступним є певний перелік дій, де $\tilde{P}_{ijk}$ – ймовірність вчинення

дії, $A$ – кількість дій, які можна виконати над об'єктом, $B$ – кількість об'єктів, $R$ – кількість суб'єктів, щоб отримати доступ, всі $R$ суб'єкти повинні мати можливість здійснити будь-яку з $A$ допущених дій з $B$ об'єктами.

Ймовірність отримання кожним суб'єктом повного доступу до кожного об'єкта виражена формулою (1):

$$\tilde{P} = \Pi_{i=1}^{R} \tilde{P}_i \quad (1)$$

Ймовірність отримання $i$-м суб'єктом доступу до будь-якого об'єкта для кожного суб'єкта (2):

$$\tilde{P}_i = \Pi_{j=1}^{B} \tilde{P}_{ij} \quad (2)$$

Ймовірність отримання доступу суб'єкта до об'єкта дорівнює добутку ймовірностей усіх дій суб'єкта до об'єкта (3):

$$\tilde{P}_{ij} = \Pi_{k=1}^{A} \tilde{P}_{ijk} \quad (3)$$

Тоді ймовірність отримання кожним суб'єктом повного доступу до кожного об'єкта виражена формулою (4):

$$\tilde{P} = \Pi_{i=1}^{R} \Pi_{j=1}^{B} \Pi_{k=1}^{A} \tilde{P}_{ijk} \quad (4)$$

Значення ймовірності отримання повного доступу визначається на підставі статистичних даних ймовірностей вчинення $k$ дій $i$ суб'єктів до $j$ об'єктів.

Критерій надійності системи сформульований наступним чином (5):

$$\tilde{P} \to 1 \quad (5)$$

Ймовірність отримання кожним суб'єктом повного доступу до кожного об'єкта виражена формулою (6):

$$\tilde{P} = \tilde{P}_1 * \tilde{P}_2 \quad (6)$$

де $\tilde{P}_1$ – ймовірність доступності сервера, $\tilde{P}_2$ – ймовірність доступності клієнта.

Ймовірність доступності сервера складається з ймовірностей доступності інформаційних ресурсів (7):

$$\tilde{P}_1 = \tilde{P}_{11} * \tilde{P}_{12} * \tilde{P}_{13} * \tilde{P}_{14} * \tilde{P}_{15} \quad (7)$$

де $\tilde{P}_{11}$ – доступність відеоінформації на сервері, $\tilde{P}_{12}$ – доступність аудіо інформації на сервері, $\tilde{P}_{13}$ – доступність файлів на сервері, $\tilde{P}_{14}$ – доступність повідомлень на сервері, $\tilde{P}_{15}$ – доступність віртуальної дошки на сервері.

Ймовірність доступності клієнта (8):

$$\tilde{P}_2 = \tilde{P}_{21} * \tilde{P}_{22} * \tilde{P}_{23} * \tilde{P}_{24} * \tilde{P}_{25} \quad (8)$$

де $\tilde{P}_{21}$ – доступність відеоінформації у клієнта, $\tilde{P}_{22}$ – доступність аудіо інформації у клієнта, $\tilde{P}_{23}$ – доступність файлів у клієнта, $\tilde{P}_{24}$ – доступність повідомлень у клієнта, $\tilde{P}_{25}$ – доступність віртуальної дошки у клієнта.

Ймовірності здійснення $k$-ї дії для сервера (9):

$$\tilde{P}_{11} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{11k}, \tilde{P}_{12} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{12k}, \tilde{P}_{13} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{13k}, \tilde{P}_{14} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{14k}, \tilde{P}_{15} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{15k}, \quad (9)$$

де $\tilde{P}_{11k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з відеоінформацією на сервері, $\tilde{P}_{12k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з аудіо інформацією на сервері, $\tilde{P}_{13k}$ ймовірність здійснення $k$-ї дії з файлами на сервері, $\tilde{P}_{14k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з повідомленнями на сервері, $\tilde{P}_{15k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з віртуальної дошкою на сервері.

Ймовірності здійснення $k$ –ї дії для клієнта (10):

$$\tilde{P}_{21} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{21k}, \tilde{P}_{22} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{22k}, \tilde{P}_{23} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{23k}, \tilde{P}_{24} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{24k}, \tilde{P}_{25} = \Pi_{k=1}^{5} \tilde{P}_{25k}, \quad (10)$$

де $\tilde{P}_{21k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з відеоінформацією у клієнта, $\tilde{P}_{22k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з аудіо інформацією у клієнта, $\tilde{P}_{23k}$ ймовірність здійснення $k$-ї дії з файлами у клієнта, $\tilde{P}_{24k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з повідомленнями у клієнта, $\tilde{P}_{25k}$ – ймовірність здійснення $k$-ї дії з віртуальної дошкою у клієнта.

У роботі запропоновано алгоритм управління доступом до інформаційних ресурсів систем відеоконференцзв'язку – алгоритм управління навантаженням мережі, призначений для використання в системах з гарантованою доставкою повідомлень, заснованих на мережному протоколі TCP стека TCP/IP.

Застосування алгоритму управління навантаженням мережі дозволяє системі відеоконференцзв'язку

функціонувати в двох режимах: стандартному і спеціальному.

Спеціальний режим складається з трьох етапів: підготовка, безпосередньо спеціальний режим і завершення роботи.

На першому етапі роботи алгоритму клієнт відправляє пакет з міткою початку спеціального режиму першому серверу відповідно до таблиці привілеїв серверів. У разі позитивної відповіді сервера встановлюється з'єднання, у разі негативної відповіді – пакет з міткою початку спеціального режиму відправляється наступному серверу.

Другий етап роботи алгоритму є безпосередньо спеціальним режимом. Відправка всіх пакетів клієнта відбувається через закріплений сервер. Кожен клієнт відправляє дані серверу, за яким він закріплений, сервер в свою чергу перенаправляє дані адресату. Клієнт може приймати інформацію від будь-якого сервера. Трафік без міток привілеїв в спеціальному режимі не обробляється. У спеціальному режимі відбувається обов'язкова перевірка автентичності мітки привілеїв, тільки при позитивному результаті пакет доставляється адресату.

На третьому етапі відбувається завершення спеціалізованого режиму.

Клієнт відправляє серверу мітку останнього пакету, після чого сервер може встановити з'єднання з ще одним клієнтом. Потім відбувається перевірка мітки останнього пакету, вона означає, що необхідно присвоїти маркеру початку спеціального режиму значення – 1, доставити останній пакет і перейти до звичайної роботі мережі.

Для вирішення можливої проблеми, пов'язаної з блокуванням сервера при втраті пакету з міткою останнього спеціального пакета, необхідно припиняти з'єднання з клієнтом в момент досягнення певного часу з моменту передачі останнього пакету.

Окремий випадок роботи алгоритму – єдиний сервер, представлений на рис. 1.

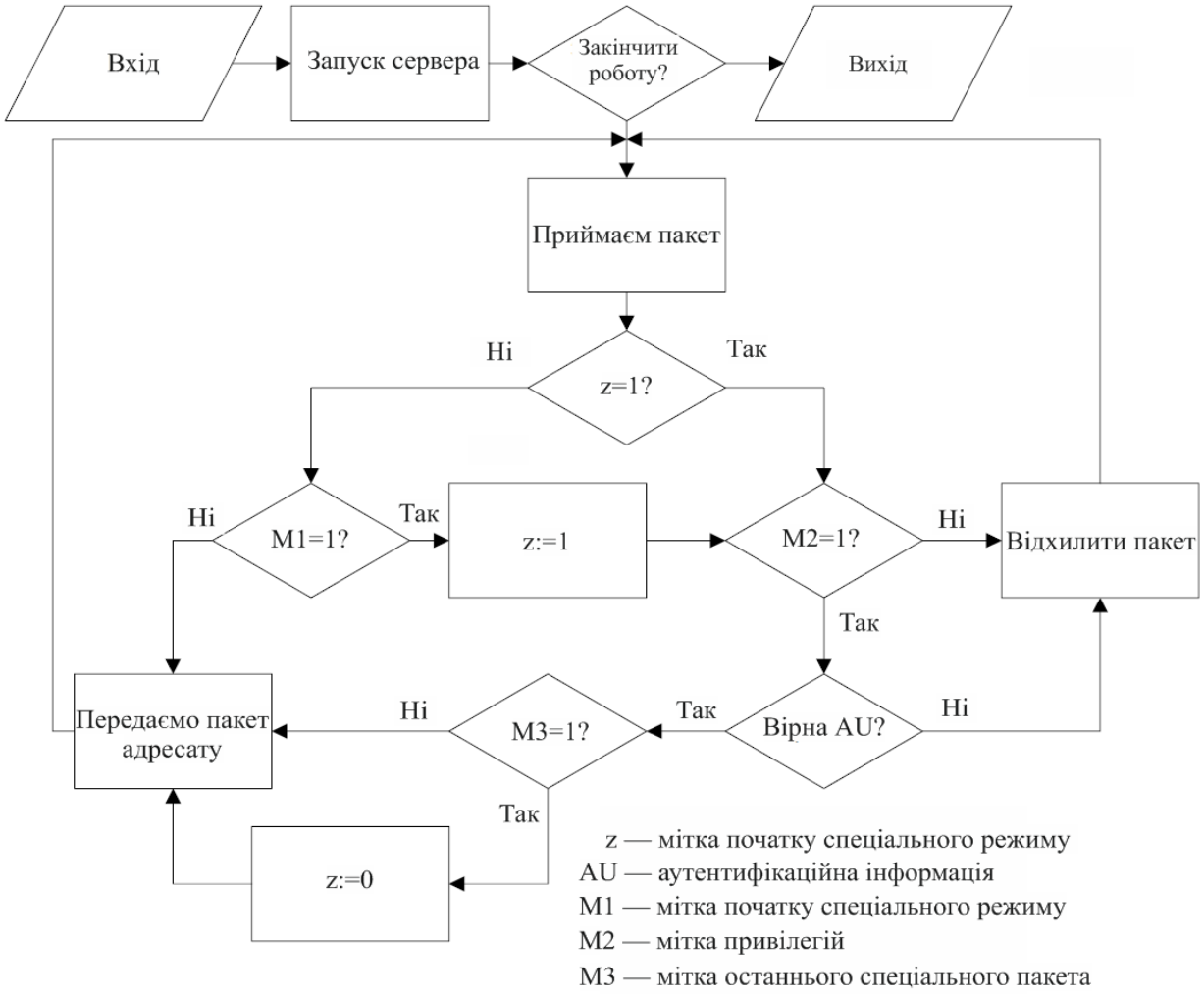



**Рис. 1. Алгоритм роботи сервера**

## Висновки

Представлений новий метод підвищення надійності відеоконференцзв'язку для авторизованих користувачів з гарантованою доставкою повідомлень.

Побудовано ймовірнісні моделі доступу верхнього і нижнього рівня до інформаційних ресурсів систем відеоконференцзв'язку. Ймовірнісні значення доступу дозволяють визначити надійність системи, що

раніше було трудомістким завданням (в інших реалізаціях ймовірнісної моделі доступу) або не розглядалося (в логічних моделях доступу). Отримане значення ймовірності отримання кожним суб'єктом повного доступу до кожного об'єкту порівнюється з необхідним значенням ймовірності отримання кожним суб'єктом повного доступу до кожного об'єкту, за необхідності в подальшому застосовується алгоритм управління навантаженням мережі.

Розроблено алгоритм керування навантаженням мережі, представлено опис алгоритму, докладно розглянуто спеціальний режим, що складається з трьох етапів: підготовка, безпосередньо спеціальний режим і завершення роботи. Більш детально розглянуто окремий випадок роботи алгоритму-мережа з єдиним сервером.

Досліджено ефективність запропонованого методу, дослідження показали, що найбільшу ефективність комп'ютерний метод підвищення надійності відеоконференцзв'язку показує при кількості серверів $n < 10$ та $P(k_{total}, k_{spec}) < 0.1$.

**Література**

1. Барышников А. А. Моделирование вероятности взлома системы информационной безопасности (системно-интегральный подход) / А. А. Барышников, И. А. Исаев // Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. – М. : Горная книга, 2010. – № 5. – С. 152–156.

2. Лебедева К. Е. Методика повышения надежности видеоконференцсвязи [Текст] / К. Е. Лебедева, Р. В. Лебедев, А. В. Мурыгин // Сибирский журнал науки и технологий. – Красноярск : СибГАУ, 2017. – № 2, т. 18. – С. 274–282.

3. Битюков В. К. Обобщенная математическая модель сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестник ТГТУ. – Тамбов : ТГТУ, 2012. – № 2. Том 18. – С. 319–326.

4. Богатырев В. А. Функциональная надежность вычислительных систем с перераспределением запросов / В. А. Богатырев, С. В. Богатырев, А. В. Богатырев // Известия ВУЗов : Приборостроение. – СПб : СПбГУ ИМТО, 2012. – Т. 55, № 10. – С. 53–57.

5. Власенко А. В. Системный анализ моделей информационной безопасности, разработка математической модели управления доступом, влияющей на оценку эффективности комплексных систем защиты / А. В. Власенко // Политематический сетевой журнал КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2014. – № 101(07). – С. 1–13.

**References**

1. Baryshnikov A. A. Modelirovanie veroyatnosti vzloma sistemy informacionnoj bezopasnosti (sistemno-integralnyj podhod) / A. A. Baryshnikov, I. A. Isaev // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten : nauchno-tehnicheskij zhurnal. – M. : Gornaya kniga, 2010. – № 5. – S. 152–156.

2. Lebedeva K. E. Metodika povysheniya nadezhnosti videokonferencsvyazi [Tekst] / K. E. Lebedeva, R. V. Lebedev, A. V. Murygin // Sibirskij zhurnal nauki i tehnologij. – Krasnoyarsk : SibGAU, 2017. – № 2, t. 18. – S. 274–282.

3. Bityukov V. K. Obobshennaya matematicheskaya model setevoj sistemy upravleniya s konkuriruyushim metodom dostupa / V. K. Bityukov, A. E. Emelyanov // Vestnik TGTU. – Tambov : TGTU, 2012. – № 2. Tom 18. – S. 319–326.

4. Bogatyrev V. A. Funkcionalnaya nadezhnost vychislitelnyh sistem s pererаspredeleniem zaprosov / V. A. Bogatyrev, S. V. Bogatyrev, A. V. Bogatyrev // Izvestiya VUZov : Priborostroenie. – SPb : SPbGU IMTO, 2012. – T. 55, № 10. – S. 53–57.

5. Vlasenko A. V. Sistemnyj analiz modelej informacionnoj bezopasnosti, razrabotka matematicheskoj modeli upravleniya dostupom, vliyayushej na ocenku effektivnosti kompleksnyh sistem zashity / A. V. Vlasenko // Politematicheskij setevoj zhurnal KubGAU. – Krasnodar : KubGAU, 2014. – № 101(07). – S. 1–13.

Рецензія/Peer review : 27.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мясіщев О.А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-97-105
УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

В.П. МАРЦЕНЮК
Університет в Бєльско-Бялій, Польща
А.С. СВЕРСТЮК
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського
Н.В. КОЗОДІЙ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Ю.В. КРАВЧИК
Хмельницький національний університет

# ВИКОРИСТАННЯ ПАКЕТУ R ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТІВ АНТИГЕНІВ З АНТИТІЛАМИ В КІБЕРФІЗИЧНИХ ІМУНОСЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ НА ПРЯМОКУТНІЙ РЕШІТЦІ

*В роботі проведено комп'ютерне моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням за допомогою пакета R. Предметом дослідження є кіберфізична імуносенсорна система на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. Метою роботи є дослідження контактів антигенів з антитілами кіберфізичної імуносенсорної системи на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням за допомогою пакета R. Реалізовано комп'ютерну програму «Комп'ютерне моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням». Проведено комп'ютерне моделювання досліджуваної моделі, наведено параметри моделі, їх числові значення, а також представлено параметри в пакеті R. Проаналізовано останні дослідження в галузі імуносенсорів, їх видів, та популярність наукових напрямів дослідження, протягом останніх років. Незважаючи на величезну різноманітність сучасних фізико-хімічних методів детектування аналітичного сигналу в імуноаналізі найбільш широко використовуються електрохімічні методи, які мають низку незаперечних переваг: висока чутливість і точність, селективність і експресність, невисока собівартість та універсальність. Описано пакет R як середовище програмування для статистичного аналізу даних із заданими значеннями параметрів моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. Наведені посилання на корисні сайти та рекомендації по роботі з пакетом R. Результати чисельного моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням дають змогу провести дослідження стійкості моделі імуносенсора. Встановлено, що її якісна поведінка суттєво залежить від часу запізнення.*

***Ключові слова:*** *кіберфізична система, біосенсор, імуносенсор, математична модель, диференціальні рівняння, пакет R.*

**V.P. MARSENYUK**
University in Belsko Biala, Poland
**A.S. SVERSTIUK**
I. Gorbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine
**N.V. KOZODII**
Ivan Pul'uj Ternopil National Technical University, Ukraine
**YU.V. KRAVCHIK**
Khmelnytsky National University, Ukraine

## THE USE OF R-PACKAGE R FOR COMPUTER MODELLING OF ANTIGEN CONTACT CONTENTS WITH ANTIBODIES IN CYBER-PHYSICAL IMMUNOSENSOR SYSTEMS ON THE RECTANGLE LATTICE

*The computer modelling of contacts of antigens with antibodies in cyberphysical immunosensory systems on a rectangular lattice using delayed differential equations with the help of the package is carried out in the work. The subject of the study is a cyberphysical immunosensory system on a rectangular lattice using delayed differential equations. The purpose of this work is to study the contacts of antigens with antibodies of the cyberphysical immunosensory system on a rectangular lattice using delayed differential equations with the help of the packet R. The computer program "Computer simulation of antigen-antibody contacts in cyberphysical immunosensory systems on a rectangular lattice using delayed differential equations" was implemented. The computer modelling of the studied model is carried out, the parameters of the model, their numerical values are given, as well as the parameters in the package R. The latest researches in the field of immunosensors, their types, and the popularity of scientific research areas have been analysed in recent years. Despite the huge variety of modern physic-chemical methods of detecting the analytical signal in immunoassay, electrochemical methods are widely used, with a number of undeniable advantages: high sensitivity and accuracy, selectivity and expressiveness, not high cost and versatility. The package R is described as a programming environment for statistical analysis of data with given values of parameters of a immunosensor model on a rectangular lattice using delayed differential equations. The links to useful sites and guidelines for working with package R. The results of numerical modelling of antibody antigens contacts in cyberphysical immunosensory systems on a rectangular lattice using delayed differential equations allow us to conduct a study of the stability of a model of an immunosensor. It is established that its qualitative behaviour essentially depends on the time of delay.*

***Key words:*** *cyber-physical system, biosensor, immunosensor, mathematical model, differential equations, packet R.*

**Вступ.** Кібер-фізична система (КФС) – фізична система, яка реалізує інтеграцію обчислень та фізичних процесів. Вони відбуваються найчастіше у вигляді вбудованих систем та мереж для моніторингу та контролю фізичних процесів в системах зі зворотнім зв'язком. У таких системах динаміка фізичних

процесів є джерелом інформації досліджуваного явища з можливістю контролю та розрахунку сигналів керування об'єктом [1].

Кібер-фізичні системи ототожнюються з проявом четвертої промислової революції, яка відбувається в сучасному світі [2]. Таким чином, існує також фізична можливість використання технологій "Internet of Things (Інтернет речей)", де необхідно використовувати сигнали від давачів і вимірювальних приладів. Таким чином, в літературі з'являється все більше публікацій [3], які привертають увагу до сучасних концепцій та пропонують нові інноваційні рішення. А. Платцер запропонував підхід на основі "динамічної логіки", де описано та проаналізовані кібер-фізичні системи [4]. В цих роботах використовуються гібридні програми (ГП) на простій мові програмування з простою семантикою. ГП дають змогу програмісту звертатись безпосередньо до дійсних значень змінних, які представляють реальні величини і визначають їх динаміку.

**Мета дослідження.** Провести комп'ютерне моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням.

**Аналіз останніх досліджень**. Важливим етапом проектування КФС є створення їх математичних моделей, які б адекватно відображали важливі, з точки зору задач дослідження, сторони просторово-часової структури імуносенсорів (рис. 1).

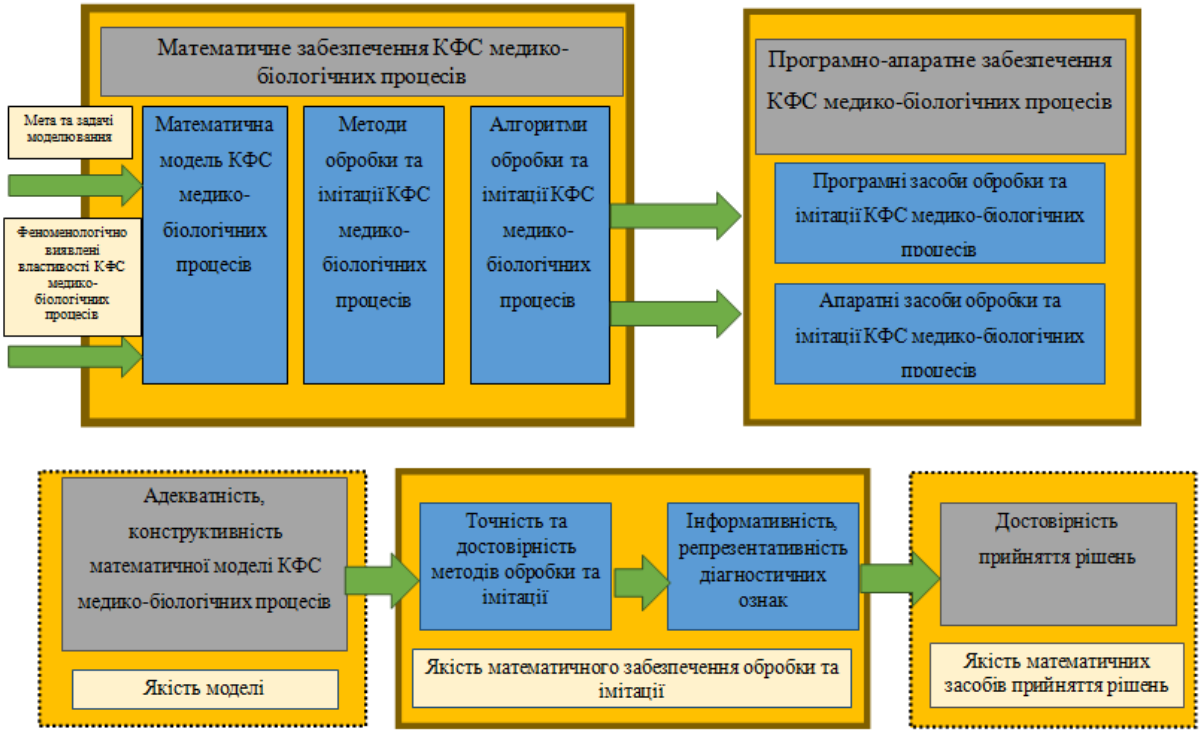



**Рис. 1. Етапи розробки та створення кіберфізичних систем медико-біологічних процесів**

Якість математичної моделі імуносенсора суттєво визначає ефективність методів його обробки в КФС, зумовлює рівень інформативності та репрезентативності діагностичних ознак, та зумовлює структуру програмної та апаратної складових проектованої інформаційної системи.

Імуносенсори відносяться до аналітичних пристроїв для якісного і кількісного аналізу біологічних компонентів дослідних зразків, які засновані на виявленні специфічних антигенів та антитіл за допомогою імунокомплексів.

Імуносенсори, що розробляються і розроблені до теперішнього часу, як правило, використовують гетерогенний формат імуноаналізу. Ґрунтуючись на характері механізму детектування, імуносенсори можуть бути розділені на електрохімічні, оптичні, п'єзоелектричні та інші. Для кожного типу характерні певні переваги і недоліки, що призводить до великої кількості досліджень під час розробки імуносенсорів [5].

Незважаючи на величезну різноманітність сучасних фізико-хімічних методів детектування аналітичного сигналу в імуноаналізі переважають електрохімічні методи, які мають низку незаперечних переваг: висока чутливість і точність (завдяки унікальному поєднанню специфічної взаємодії антиген-антитіл і чутливої електрохімічної детекції), селективність і експресність, не висока собівартість та універсальність.

Слід зазначити, що основним компонентом всіх імуносенсорів є рецепторний шар, що представляє собою антигени, моно-поліклональні антитіла, або їх фрагменти, певним чином нанесені на робочу поверхню трансдьюсера. Одна з проблем, пов'язана з ефективністю сендвіч-аналізу, на основі антитіл,

полягає в можливості взаємодії не тільки з визначеними антитілами, а й іншими імуноглобулінами, що утворюються при різних системних захворюваннях. Ці білки знаходяться в 40% сироватки здорових пацієнтів і можуть призводити до хибних позитивних результатів аналізу. У пошуках альтернативних антитіл застосовують фрагменти антитіл, аптамери і білкові каркаси неімуноглобулінів [6–8]. Альтернативні молекули повинні задовольняти ряду вимог, а саме: їх необхідно швидко і недорого виготовляти, повинні бути стабільні в різних умовах, мати тривалий термін зберігання. При цьому «замінники» антитіл повинні володіти необхідною чутливістю і специфічністю [9]. Фрагменти антитіл, що володіють високою специфічністю для їх цільового аналіту, здатністю підтримувати розпізнавання антигену, невеликими розміри, в порівнянні з повним антитілом, більш застосовні для іммобілізації, ніж наявні природно сформовані антитіла, і стають важливими інструментами в дослідженні і створенні імуносенсорів [10]. Для іммобілізації біорецепторів в імуносенсорах застосовують методи, які використовуються при розробці біосенсорів.

У роботі [11] проведено порівняльний аналіз електрохімічних імуносенсорів з іммобілізованими антитілами чотирма різними способами (фізичної сорбції, ковалентного зв'язування з застосуванням глутарового альдегіду, ковалентного зв'язування з застосуванням IgG людини і протеїну А). Проведені випробування показали, що найкращими аналітичними характеристиками володіє останній тип сенсорів.

В ідеалі імуносенсор повинен бути багаторазовим пристроєм, оскільки оборотність взаємодії антиген-антитіло може дозволити регенерувати іммобілізований компонент. Однак висока константа афінності і проблема часто необхідних досить «суворих» умов іммобілізації антитіла або антигену, роблять регенерацію поверхні важкою для реалізації, тим самим обмежуючи практичне застосування імуносенсорів [12].

**Пакет R як середовище програмування для статистичного аналізу даних та дослідження кіберфізичних імуносенсорних систем**

Пакет R – це середовище програмування для статистичного аналізу даних, яке складається з базової програми R та окремих пакетів, які реалізують спеціальні методи та технології статистичної обробки даних. Програма R є некомерційною і вільно розповсюджується за умови дотримання вимог GNU General Public License [13].

R застосовується скрізь, де потрібна робота з даними. Це не тільки статистика в вузькому сенсі слова, а й «первинний» аналіз (графіки, таблиці спряженості), а також сучасне математичне моделювання. Дана програма також використовується як альтернатива комерційним програмним середовищам аналізу даних рівня MatLab / Octave. аналізі: від обчислення середніх величин до вейвлет-перетворень тимчасових рядів.

Додаткової популярності R дало створення системи зберігання і розповсюдження пакетів – CRAN (Comprehensive R Archive Network — http://cran.r-project.org) [14]. Статистичні алгоритми зазвичай виконуються у вигляді скриптів і зібрані у пакети (packages) R. Під час інсталяції разом з базовою програмою інсталюються й основні пакети, у яких реалізовано найбільш популярні методи статистичного аналізу. Частина цих пакетів автоматично завантажується під час запуску R. Інші пакети можна завантажити, використовуючи функцію library.

Переваги пакета R :

• пакет R є вільнопоширюваним програмним забезпеченням (можна безкоштовно завантажити з сайту http://www.r-project.org);

• є реалізації під операційні системи Microsoft Windows, Mac OS X, Linux;

• базова комплектація R займає небагато місця на диску і містить всі функції, необхідні для проведення статистичного аналізу;

• завжди можна додатково встановити допоміжні пакети;

• хороша графічна візуалізація подання даних та результатів їхнього аналізу;

• можливість самостійного написання необхідних функцій.

**Робота з пакетом R**

Після відкриття програми пакет R x64 3.5.2 з'являється головна сторінка програми (рис. 2).

У верхній частині вікна знаходиться головне меню, а нижче відкрито вікно «консолі R», в якій можна давати інструкції програмі та отримувати її відповіді. На рис. 3 виведено початкову інформацію про версію базової програми R.

Під час роботи з R можна виконувати одразу багато інструкцій, що записані в окремому файлі. Найпростіший спосіб зробити – це завантажити такий файл в якому-небудь текстовому редакторі, скопіювати, а потім вставити на консолі. При цьому, якщо інструкції у файлі розміщені у окремих рядках, розділових знаків між ними не потрібно. Інструкції, вміщені в одному рядку, розділяють символом «;». Якщо довга інструкція не вміщується у одному рядку, її можна розбити на декілька рядів, причому, при переході до наступного рядка R автоматично виводить символ продовження «+». R сам здогадується, що інструкція не закінчена за її синтаксисом. Тому деякі синтаксичні помилки (як-от забуті дужки) можуть сприйматись як незакінчені інструкції. У цьому випадку R присвоїть + на початку наступного рядка і перейде у режим очікування. Натиснувши Escape можна перейти у режим введення нової інструкції без продовження аналізу попередньої. Програми, що складаються з інструкцій R, називають скриптами (script). Вони мають стандартне розширення .r. У базовій програмі є можливість відкрити вікно редактора для

створення нового скрипту, або завантажити файл зі скриптом, використовуючи пункти головного меню File->Newscript або File->Openscript. Виконати завантажений у вікні редактора скрипт повністю можна, використовуючи Edit->Runall.

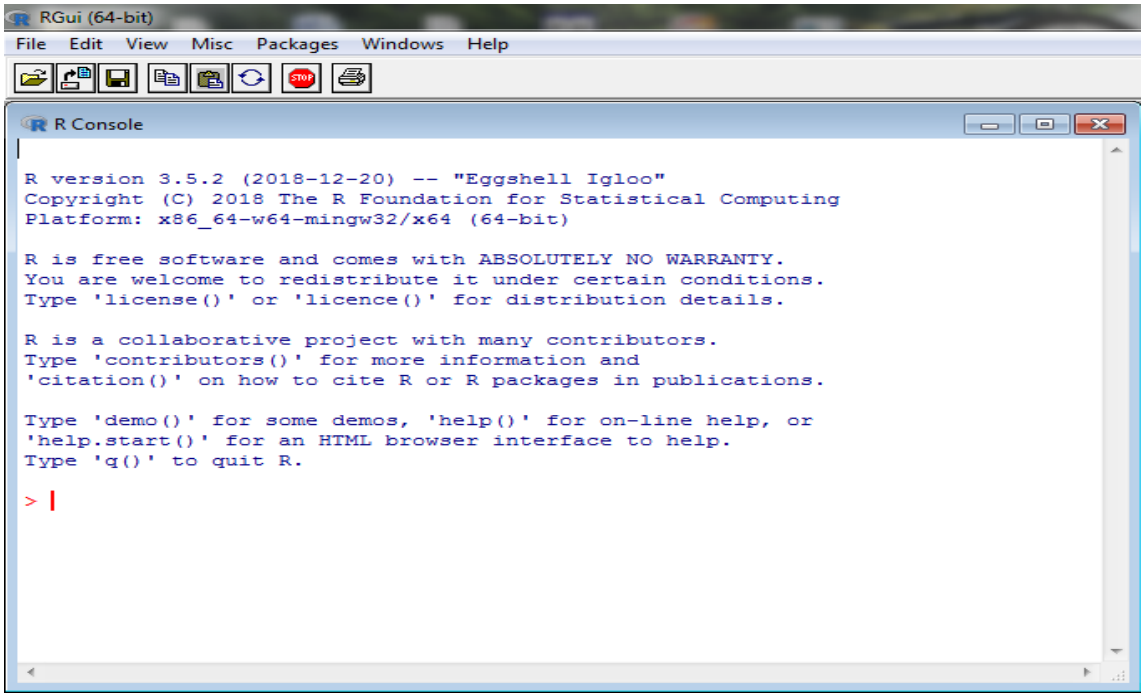



**Рис. 2. Головна сторінка програми програми пакету R x64 3.5.2.**

Зберегти скрипт можна за допомогою команди File->Save.

**Пакети в R**

Одна з важливих переваг R – наявність для нього різноманітних розширень або пакетів, які реалізують найбільш популярні технології статистичної обробки [15]. Частина цих пакетів автоматично завантажується при запуску R.

Якщо потрібний пакет не було інстальовано на комп'ютері, його можна завантажити з інтернет-архіву, використовуючи пункти головного меню Packages->Installpackage(s). Спочатку програма пропонує вибрати інтернет-архів, з якого робиться інсталяція. Варіант 0-cloud, що пропонується за замовчуванням, як правило, працює цілком задовільно. Після цього потрібно у списку вибрати необхідний пакет. Якщо цей пакет використовує інші пакети R, яких немає на комп'ютері, вони будуть інстальовані автоматично.

Після того, як пакети інстальовані, вони зберігаються на комп'ютері, але для роботи з ними під час сеансу їх необхідно підключати, використовуючи функцію library. Усі об'єкти, створені або завантажені під час сеансу роботи з R і не видалені спеціальною інструкцією, зберігаються у робочому просторі. Наприкінці сеансу R запитує, чи зберігати робочий простір на диску: «Save workspace image?». Якщо вибрати збереження, то цей робочий простір буде відновлено на початку наступного сеансу. Зберігати робочий простір доцільно лише в тому випадку, коли є необхідність наступного разу продовжити роботу з того самого місця, на якому була закінчена робота попереднього разу.

**Корисні сайти, списки посилань і документація по пакету R**

http://www.r-project.org/ — сайт проекту;
http://cran.r-project.org/ — CRAN;
https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/ — список посилань R-help;
http://finzi.psych.upenn.edu/nmz.html — пошук в матеріалах по R;
http://www.statmethods.net/index.html — хороший довідник ресурс;
http://zoonek2.free.fr/UNIX/48_R/all.html — довідник по R;
http://pj.freefaculty.org/R/Rtips.html — поради по використанні R.

**Результати чисельного моделювання імуносенсора на прямокутній решітці у вигляді фазових площин.**

З метою отримання результатів чисельного моделювання кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням вводяться значення параметрів моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. У комп'ютерній програмі «Комп'ютерне моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням» визначальними є параметри моделі, їх числові значення, а також представлення параметрів та їх числових значень в пакеті R, згідно з табл. 1.

Таблиця 1

**Значення параметрів моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням**

| № п/п | Назва параметра моделі | Числові значення параметрів | Представлення параметрів та їх числових значень в пакеті R |
|---|---|---|---|
| 1. | Ціле натуральне число, яке характеризує кількість імунопікселів в прямокутній решітці | $N = 4$ | N <- 16#4#16 |
| 2. | Константа народжуваності для популяції антигенів | $\beta = 2\min^{-1}$ | beta <- 2 |
| 3. | Ймовірнісна швидкість нейтралізації антигенів антитілами; | $\gamma = 2\frac{mL}{\min\cdot\mu g}$ | gamma <- 2 |
| 4. | Стала смертності антитіл | $\mu_f = 1\min^{-1}$ | mu_f <- 1 |
| 5. | Щільність антигенів | $\eta = 0.8/\gamma$ | etha <- 0.8/gamma #0.01184/gamma |
| 6. | Швидкість, з якою популяція антигенів прагне до деякої межі насичення | $\delta_v = 0.5\frac{mL}{\min\cdot\mu g}$ | delta_v <- 0.5 #0.035 #0.7 |
| 7. | Швидкість, з якою популяція антитіл прагне до деякої межі насичення | $\delta_f = 0.5\frac{mL}{\min\cdot\mu g}$ | delta_f <- 0.5 #0.0175 #0.2 |
| 8. | Постійна запізнення в часі, з якою настає імунна відповідь | $\tau = 0.05$, $\tau = 0.22$, $\tau = 0.23$ $\tau = 0.2865$ | tau <- 0.05#0.22#0.23#0.2865 |
| 9. | Коефіцієнт дифузії | $D = 0.2\frac{nm^2}{\min}$ | D <- 0.2 |
| 10. | Відстань між пікселями | $\Delta = 0.3nm$ | Delta <- 0.3 |
| 11. | Стала дисбалансу | $n > 0$ | n <- 0.9 #1. |
| 12. | Коефіцієнт пропорційності інтенсивності флуоресценції до кількості контактів між антигенами та антитілами | $k_{fl}$ | k_fl <- 1 |
| 13. | Порогове значення, що визначає перехід до стану флуоресценції в біопікселі | $\Theta_{fl}$ | fluorescence_intensity_threshold <- 1.5 |

Після введення відповідних значень параметрів моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням, згідно з табл. 1, представлення в пакеті R x64 3.5.2 отримаємо у вигляді рис. 3.

На рисунку 2 також наведено результат введення математичної моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь, яка має вигляд

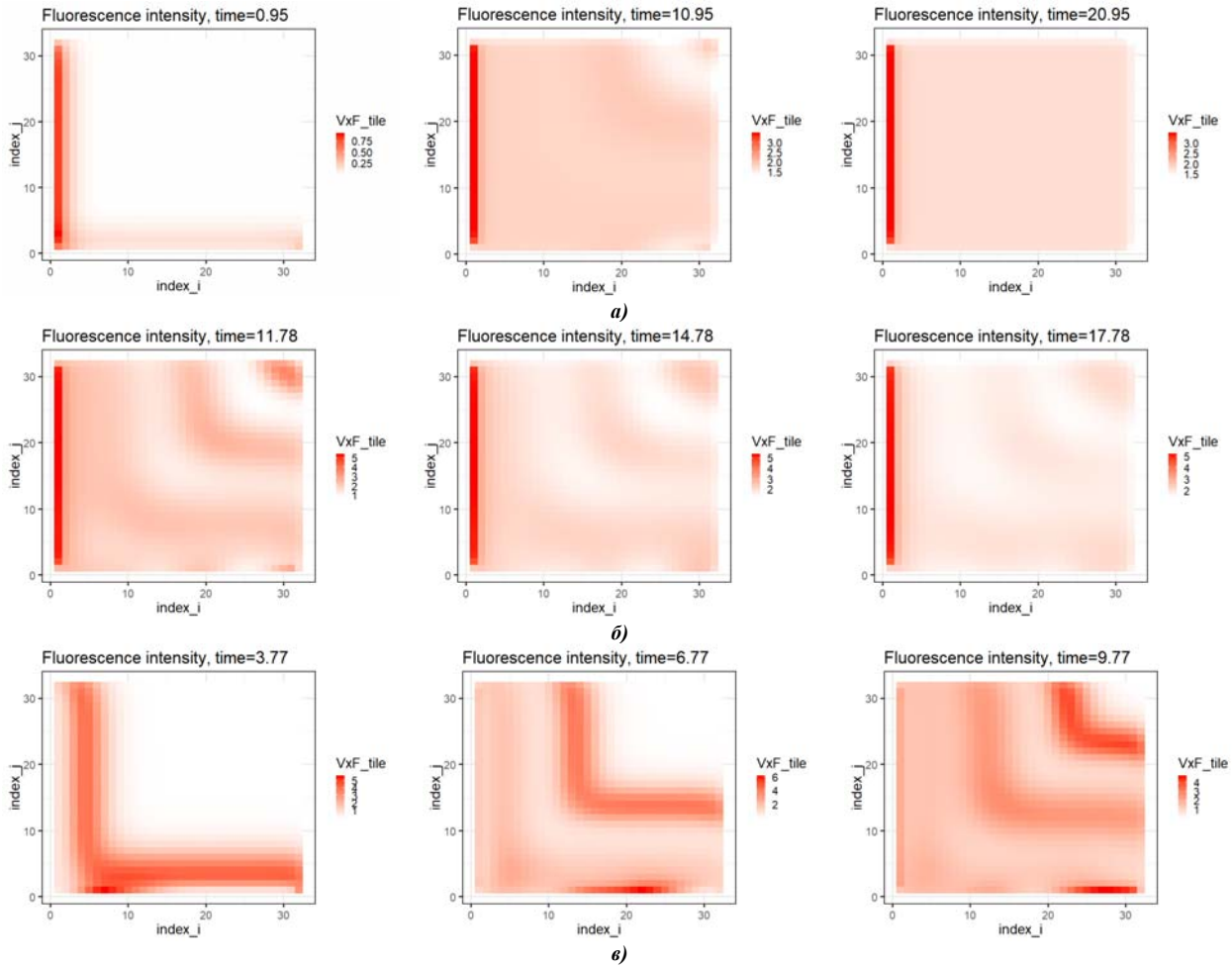
$$\begin{aligned}\frac{dV_{i,j}(t)}{dt} &= (\beta - \gamma F_{i,j}(t-\tau) - \delta_v V_{i,j}(t-\tau))V_{i,j}(t) + \hat{S}\{V_{i,j}\} \\ \frac{dF_{i,j}(t)}{dt} &= (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j}(t))F_{i,j}(t)\end{aligned}. \quad (1)$$

На даному етапі комп'ютерного моделювання моделі імуносенсора було використано решітчасті графіки. Спершу побудовано відповідні графіки, на яких для кожного пікселя представлено ймовірність контакту антигенів з антитілами, як $V_{i,j,k} \times F_{i,j,k}$ при $\tau = 0.05$, $\tau = 0.22$, $\tau = 0.23$, $\tau = 0.2865$, представлені на рис. 3(а–г).

D:\Наука\R_ImmunosensorModel6_CyberPhysical.R - R Editor

```
library(deSolve)
library(rootSolve)
#libraries for visualization
library(ggplot2)
library(reshape)
#-----------------------------
# setting parameters
#-----------------------------
N <- 32#4#16
beta <- 2.
gamma <- 2.         #2
mu_f <- 1.
etha <- 0.8/gamma      #0.01184/gamma
delta_v <-  0.5  #0.035 #0.7
delta_f <-  0.5  #0.0175 #0.2

tau <- 0.05#0.22#0.23#0.2865

D <- 0.2
Delta <- 0.3
n <- 0.9 #1.

k_fl <- 1.
fluorescence_intensity_threshold <- 1.5

#-----------------------------
#  endemic "identical" steady state
#-----------------------------
V_ij_star <- (-beta*delta_f - gamma * mu_f)/(delta_v * delta_f - etha * gamma *gamma)
F_ij_star <- (delta_v * mu_f - etha * gamma * beta)/(delta_v*delta_f - etha*gamma*gamma)

print(V_ij_star)
print(F_ij_star)
```

**Рис. 3. Представлення в пакеті R x64 3.5.2 математичної моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням та відповідних параметрів, згідно з табл. 1**

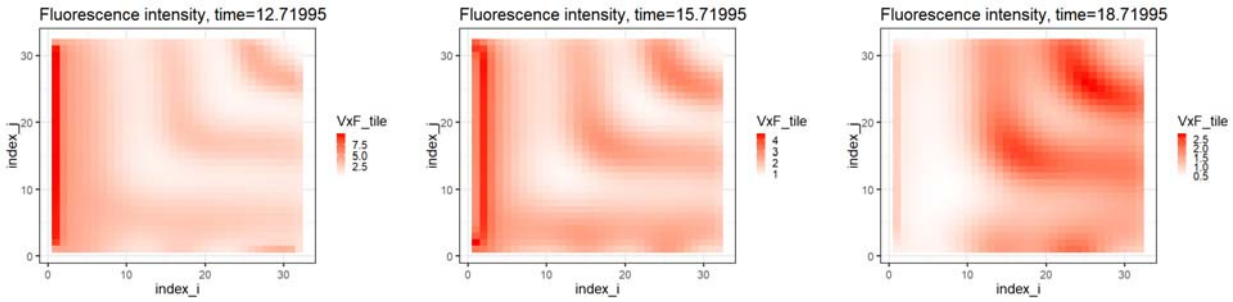



*а)*

*б)*

*в)*

**Рис. 4. Решітчасті зображення зав'язків антигенів з антитілами в пікселях системи (1) при $\tau = 0.05$ ; (*а*), $\tau = 0.22$ (*б*), $\tau = 23$ (*в*), $\tau = 0.2865$ (*г*)**




*г)*

**Рис. 4. Решітчасті зображення зав'язків антигенів з антитілами в пікселях системи (1) при $\tau = 0.05$ ; (*а*), $\tau = 0.22$ (*б*), $\tau = 23$ (*в*), $\tau = 0.2865$ (*г*) (продовження)**

Згідно з рис. 3(а-г) спостерігаємо, що при зміні значення $\tau$ змінюється якісна поведінка пікселів та всього імуносенсора. Наприклад, при $\tau \in [0, 0.22]$ бачимо траєкторію, що відповідає стійкому вузлу для всіх пікселів (рис. 3(а, б)).

При значенні $\tau$ близьких до $0.23$ *хв*. виникає біфуркація Хопфа та подальші траєкторії відповідають стійким граничним циклам еліпсоподібної форми для усіх пікселів (рис. 3(в) для $\tau = 0.23$ ). Для значень $\tau > 0.27$ спостерігаємо хаотичну поведінку (рис. 3г).

Детальний опис математичної моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням представлено в роботах [17–20].

Фрагмент лістингу комп'ютерної програми «Комп'ютерне моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням»

```
  #------------------------------
  # tile plot for dynamic changes of pixels
  #------------------------------
  increment = times[2]-times[1]
  for(i in seq(1,round(max(times)/increment),by=round(max(times)/(100*increment))))
  {
    V_tile<-yout[i,2:(N*N+1)]
    F_tile<-yout[i,(N*N+2):(2*N*N+1)]

    time = yout[i,1]
    biosensor_matrix_V_tile.data <- data.frame(V_tile,index_i,index_j)
    biosensor_matrix_F_tile.data <- data.frame(F_tile,index_i,index_j)
    biosensor_matrix_V_tile <- ggplot(biosensor_matrix_V_tile.data, aes(x=index_i,y=index_j)) +
ggtitle(paste("V time=",time,sep=""))

dir.create(file.path(paste("D:/My_doc/Sverstiuk/Biosensors/Imunosensory/Plots6_CyberPhysical/",
paste("Tau",tau,sep=""),sep=""),"V_matrix"), showWarnings = FALSE)
    setwd(file.path(paste("D:/My_doc/Sverstiuk/Biosensors/Imunosensory/Plots6_CyberPhysical/",
paste("Tau",tau,sep=""),sep=""),"V_matrix"))
    png(paste(paste("Tau",tau,"time",time,"_Matrix_V",sep=""),"png",sep="."), width = 800, height
= 600)
    biosensor_matrix_V_tile <- biosensor_matrix_V_tile + geom_tile(aes(fill=V_tile))
    biosensor_matrix_V_tile <- biosensor_matrix_V_tile + scale_fill_gradientn(colours =
terrain.colors(10)) + theme_set(theme_bw(base_size=28))
    print(biosensor_matrix_V_tile)
    dev.off()
    biosensor_matrix_F_tile <- ggplot(biosensor_matrix_F_tile.data, aes(x=index_i,y=index_j)) +
ggtitle(paste("F time=",time,sep=""))

dir.create(file.path(paste("D:/My_doc/Sverstiuk/Biosensors/Imunosensory/Plots6_CyberPhysical/",
paste("Tau",tau,sep=""),sep=""),"F_matrix"), showWarnings = FALSE)
    setwd(file.path(paste("D:/My_doc/Sverstiuk/Biosensors/Imunosensory/Plots6_CyberPhysical/",
paste("Tau",tau,sep=""),sep=""),"F_matrix"))
    png(paste(paste("Tau",tau,"time",time,"_Matrix_F",sep=""),"png",sep="."), width = 800, height
= 600)
    biosensor_matrix_F_tile <- biosensor_matrix_F_tile + geom_tile(aes(fill=F_tile))
    biosensor_matrix_F_tile <- biosensor_matrix_F_tile + scale_fill_gradientn(colours =
terrain.colors(10)) + theme_set(theme_bw(base_size=28))
    print(biosensor_matrix_F_tile)
    dev.off()
  }
```

**Висновок.** Описано пакет R як середовище програмування для статистичного аналізу даних, представлено фрагмент роботи з досліджуваним пакетом, наведені посилання на корисні сайти, списки посилань і документація по пакету R. В роботі проведено комп'ютерне моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням за допомогою пакету R. Отримані результати мають визначальне

значення при дослідженні стійкості моделі імуносенсора. При цьому враховується наявність колоній антигенів та антитіл, що локалізовані у пікселях, а також дифузія колоній антигенів між пікселями.

**Література**


1. E. A. Lee, “Cyber physical systems: Design challenges,” Center for Hybrid and Embedded Software Systems, EECS University of California, Berkeley, CA 94720, USA, Tech. Rep. UCB/EECS-2008-8, Jan. 2008, p. 10. [Online]. Avail- able: https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/ EECS-2008-8.pdf.

2. J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,” Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18–23, 2015, ISSN: 2213- 8463. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X.

3. K.-D. Kim, P. R. Kumar, “Cyber–physical systems: A perspective at the centennial,” Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1287–1308, May 2012. DOI: 10.1109/jproc.2012.2189792. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2189792.

4. Platzer (2008) “Differential dynamic logic for hybrid systems.,” Journal of Automated Reasoning, vol. 41, no. 2, pp. 143–189, 2008, ISSN: 0168-7433. DOI: 10.1007/s10817-008-9103-8.

5. Martsenyuk V.P. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks / A. Klos-Witkowska, A.S. Sverstiuk // Medical informatics and engineering. – 2018.-№ 1(41). – p.13-19. DOI: https://dx.doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.1.8887.

6. Karunakaran, Ch. Chapter 4 Immunosensors Biosensors and Bioelectronics / Ch. Karunakaran, M. Pandiaraj, P. Santharaman. – New York: Elsevier Inc. – 124 pp

7. Kaspar Binz, H. Engineering novel binding proteins from nonimmunoglobulin domains / H. Kaspar Binz, P. Amstutz, A. Plückthun // Natural Biotechnology. – 2005. – V. 23. – I. 10. – P. 1257 – 1268.

8. Renberg, B. Affibody molecules in protein capture microarrays: evaluation of multidomain ligands and different detection formats / B. Renberg, J. Nordin, A. Merca, M. Uhlén, J. Feldwisch // Journal of Proteome Resourses. – 2007. – V. 6. – P. 171 – 179.

9. Miao, Z. Protein scaffold–based molecular probes for cancer molecular imaging / Z. Miao, J. Levi, Z. Cheng // Amino Acids. – 2010. – V. 1. – P. 9.

10. Binz, H.K. Engineered proteins as specific binding reagents / H.K. Binz // Current Opinion in Biotechnology. – 2005. – V. 16. – P. 459 – 469.

11. Dillon, P.P. Immunoassay for the determination of morphine–3–glucuronide using a surface plasmon resonance–based biosensor / P.P. Dillon, S.J. Daly, B.M. Manning, R. O’Kennedy // Biosensors and Bioelectronics. – 2003. – V. 18. – P. 217 – 227

12. Tang, J. Amplified impedimetric immunosensor based on instant catalyst for sensitive determination of ochratoxin A / J. Tang, Y. Huang, C. Zhang, H. Liu, D. Tang // Biosensors and Bioelectronics. – 2016. – V. 86. – P. 386 – 392.

13. Liu, Y. Single Chain Fragment Variable Recombinant Antibody Functionalized Gold Nanoparticles for a Highly Sensitive Colorimetric Immunoassay / Y. Liu, Y. Liu, R. L. Raymond, X. Zenga // Biosensors and Bioelectronics. – 2009. – V. 24. – I. 9. – P. 2853 – 2857

14. Jon Sáenz, Santos J. González-Rojí, Sheila Carreno-Madinabeitia, Gabriel Ibarra-Berastegi, Analysis of atmospheric thermodynamics using the R package aiRthermo, Computers & Geosciences,Volume 122,2019, Pages 113-119, ISSN 0098-3004, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.007.

15. Carla A.R.S. Fontoura, Gastone Castellani, José C.M. Mombach, The R implementation of the CRAN package PATHChange, a tool to study genetic pathway alterations in transcriptomic data, Computers in Biology and Medicine, Volume 78, 2016, Pages 76-80, ISSN 0010-4825, https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2016.09.010.

16. Daniel Adler, Duncan Murdoch, et al. rgl: 3D Visualization Using OpenGL. R package version 0.96.0. 2016. url: https://CRAN.R-project.org/package=rgl.

17. Martsenyuk V. Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay / A. Klos-Witkowska, A. Sverstiuk // Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations: No. 2018(27), p. 1-31. ISSN: 1417-3875. Scopus, Web of Science. Impact Factor: 0.881. DOI: 10.14232/ejqtde.2018.1.27.

18. Марценюк В.П. Об использовании решетчастых дифференциальных уравнений с запаздыванием для моделирования иммуносенсора / И.Е. Андрущак, П.Н. Зинько, А.С. Сверстюк // Проблемы управления и информатики : международный научно-технический журнал. – 2018. – № 3. – С. 37–45.

19. Марценюк В.П. Модель імуносенсора на основі решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням / В.П. Марценюк, А.С. Сверстюк // Штучний інтелект. – 2018. – № 1. – С. 42–47.

20. Марценюк В.П. Подход к исследованию глобальной асимптотической устойчивости решетчатых дифференциальных уравнений с запаздыванием для моделирования иммуносенсоров / А.С. Сверстюк, И.Е. Андрущак // Проблемы управления и информатики : международный научно-технический журнал. – 2019. – № 1. – С. 62–74.

**References**

1. E. A. Lee, “Cyber physical systems: Design challenges,” Center for Hybrid and Embedded Software Systems, EECS University of California, Berkeley, CA 94720, USA, Tech. Rep. UCB/EECS-2008-8, Jan. 2008, p. 10. [Online]. Avail- able: https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/ EECS-2008-8.pdf.

2. J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,” Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18–23, 2015, ISSN: 2213- 8463. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S221384631400025X.

3. K.-D. Kim, P. R. Kumar, “Cyber–physical systems: A perspective at the centennial,” Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1287–1308, May 2012. DOI: 10.1109/jproc.2012.2189792. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2189792.

4. Platzer (2008) “Differential dynamic logic for hybrid systems.,” Journal of Automated Reasoning, vol. 41, no. 2, pp. 143–189, 2008, ISSN: 0168-7433. DOI: 10.1007/s10817-008-9103-8.

5. Martsenyuk V.P. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks / A. Klos-Witkowska, A.S. Sverstiuk // Medical informatics and engineering. – 2018.-№ 1(41). – p.13-19. DOI: https://dx.doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.1.8887.

6. Karunakaran, Ch. Chapter 4 Immunosensors Biosensors and Bioelectronics / Ch. Karunakaran, M. Pandiaraj, P. Santharaman. – New York: Elsevier Inc. – 124 pp

7. Kaspar Binz, H. Engineering novel binding proteins from nonimmunoglobulin domains / H. Kaspar Binz, P. Amstutz, A. Plückthun // Natural Biotechnology. – 2005. – V. 23. – I. 10. – P. 1257 – 1268.

8. Renberg, B. Affibody molecules in protein capture microarrays: evaluation of multidomain ligands and different detection formats / B. Renberg, J. Nordin, A. Merca, M. Uhlén, J. Feldwisch // Journal of Proteome Resourses. – 2007. – V. 6. – P. 171 – 179.

9. Miao, Z. Protein scaffold–based molecular probes for cancer molecular imaging / Z. Miao, J. Levi, Z. Cheng // Amino Acids. – 2010. – V. 1. – P. 9.

10. Binz, H.K. Engineered proteins as specific binding reagents / H.K. Binz // Current Opinion in Biotechnology. – 2005. – V. 16. – P. 459 – 469.

11. Dillon, P.P. Immunoassay for the determination of morphine–3–glucuronide using a surface plasmon resonance–based biosensor / P.P. Dillon, S.J. Daly, B.M. Manning, R. O’Kennedy // Biosensors and Bioelectronics. – 2003. – V. 18. – P. 217 – 227

12. Tang, J. Amplified impedimetric immunosensor based on instant catalyst for sensitive determination of ochratoxin A / J. Tang, Y. Huang, C. Zhang, H. Liu, D. Tang // Biosensors and Bioelectronics. – 2016. – V. 86. – P. 386 – 392.

13. Liu, Y. Single Chain Fragment Variable Recombinant Antibody Functionalized Gold Nanoparticles for a Highly Sensitive Colorimetric Immunoassay / Y. Liu, Y. Liu, R. L. Raymond, X. Zenga // Biosensors and Bioelectronics. – 2009. – V. 24. – I. 9. – P. 2853 – 2857

14. Jon Sáenz, Santos J. González-Rojí, Sheila Carreno-Madinabeitia, Gabriel Ibarra-Berastegi, Analysis of atmospheric thermodynamics using the R package aiRthermo, Computers & Geosciences,Volume 122,2019, Pages 113-119, ISSN 0098-3004, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.007.

15. Carla A.R.S. Fontoura, Gastone Castellani, José C.M. Mombach, The R implementation of the CRAN package PATHChange, a tool to study genetic pathway alterations in transcriptomic data, Computers in Biology and Medicine, Volume 78, 2016, Pages 76-80, ISSN 0010-4825, https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2016.09.010.

16. Daniel Adler, Duncan Murdoch, et al. rgl: 3D Visualization Using OpenGL. R package version 0.96.0. 2016. url: https://CRAN.R-project.org/package=rgl.

17. Martsenyuk V. Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay / A. Klos-Witkowska, A. Sverstiuk // Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations: No. 2018(27), p. 1-31. ISSN: 1417-3875. Scopus, Web of Science. Impact Factor: 0.881. DOI: 10.14232/ejqtde.2018.1.27.

18. Marcenyuk V.P. Ob ispolzovanii reshetchastyh differencialnyh uravnenij s zapazdyvaniem dlya modelirovaniya immunosensora / I.E. Andrushak, P.N. Zinko, A.S. Sverstyuk // Problemy upravleniya i informatiki : mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2018. – № 3. – S. 37–45.

19. Martseniuk V.P. Model imunosensora na osnovi reshitchastykh dyferentsialnykh rivnian iz zapiznenniam / V.P. Martseniuk, A.S. Sverstiuk // Shtuchnyi intelekt. – 2018. – № 1. – S. 42–47.

20. Marcenyuk V.P. Podhod k issledovaniyu globalnoj asimptoticheskoj ustojchivosti reshetchatyh differencialnyh uravnenij s zapazdyvaniem dlya modelirovaniya immunosensorov / A.S. Sverstyuk, I.E. Andrushak // Problemy upravleniya i informatiki : mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2019. – № 1. – S. 62–74.

Рецензія/Peer review : 15.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-106-110
УДК 004.891

О.В. ОГНЄВИЙ, М.В. ЗАВОРОТНИЙ, А.М. ОГНЕВА
Хмельницький національний університет

# МЕТОДИ СТВОРЕННЯ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ РЕСУРСАМИ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

*Стаття присвячена дослідженню теоретико-методологічних засад та практичних рекомендацій з питань ефективного управління інформаційними ресурсами підприємства в режимі реального часу. Розглядаються питання застосування технології мультиагентних систем для формування ефективної системи управління ресурсами підприємства у реальному часі. У зв'язку з цим стає актуальним завдання розробки моделей, методів і засобів для створення мультиагентних систем управління, планування та оптимізації мобільними ресурсами підприємства. Використання мультиагентних технологій дає можливість своєчасно реагувати на непередбачені події, що виникають в умовах господарювання, планувати та контролювати роботу персоналу підприємства в реальному часі. В статі розглянуто основні властивості агентів та визначено завдання управління мобільними ресурсами підприємства. Представлено моделі інформаційних потоків ресурсів підприємства за допомогою мультиагентного підходу. Для коректного та ефективного застосування технології програмних агентів досліджено загальні принципи і механізми їх взаємодії з інформаційними ресурсами підприємства в режимі реального часу.*

*Ключові слова: інформаційні ресурси, інформаційні системи, мультиагентна технологія, програмний агент, управління ресурсами, режим реального часу.*

O.V. OGNEVY, M.V. ZAVOROTNIY, A.M. OGNEVA
Khmelnytskyi National University

## METHODS OF CREATION MULTIPLE AGENT SYSTEMS MANAGEMENT BY INFORMATIVE RESOURCES IN REAL-TIME

*The article is devoted to the study of theoretical and methodological foundations and practical recommendations on the issues of effective management of information resources of the enterprise in real time. We are seeking for ways to apply the technology of multiagent systems to establish an effective management method of the resources. Modern enterprises are complex dynamically developing systems in time. They include a large number of elements, implement production and management functions, and have a multi-level structure, a large number of external and internal information nodes. Therefore, the importance of an integrated approach to automating information processes at enterprises is growing. What it means is that the efficiency of information processes is depends on how widely it covers the complexes of calculations conducted in the management. Taking into the account everything what has been said above the task of developing models, methods and tools for the creation of multi-agent management systems, planning and optimization of enterprise's mobile resources becomes a topical issue. The use of multi-agent technologies makes it possible to react in a blink of the eye to unforeseen events occurring in the conditions of management, to plan and control the work of the personnel of the enterprise in real time. To take control over modern business management it's required to develop the separated next-generation intelligence systems that automize decision-making processes that are built not as traditional closed, centralized, monolithic, or sequential IT systems, but as digital platforms of "artificial intelligence" (AI) and ecosystems of intelligent services capable of autonomous , asynchronous and parallel functioning, instantaneous reaction to events able to plan and coordinate their actions in the presence of conflicting interests and limited resources and also to control over the implementation of ambitious plans. In the article we considered the main properties of agents, determined the tasks of management exploiting the mobile resources of the enterprise. The models of information streams of resources are presented with the help of multi-agent approach. For the correct and efficient application of the technology of software agents, the general principles and mechanisms of their interaction with the information resources of the enterprise in real time are investigated.*

*Key words: information resources, information systems, multiagent technology, program agent, resource management, real-time mode.*

**Вступ.** Інформаційні ресурси (ІР) відіграють важливу роль практично в усіх сферах народного господарства нашої країни і суспільства, в процесі господарської діяльності сучасних підприємств. Для нормального функціонування підприємства будь-якого масштабу недостатньо тільки матеріальні, фінансові і людські ресурси, необхідно знати, що з цим усім треба робити, отже мати інформацію про технології. Інформація, інформаційні ресурси розглядаються як окрема економічна категорія на основі вчасно наданої, достовірної і повної інформації приймаються управлінські рішення, конкурентоспроможність будь-якої організаційної структури напряму залежить від кількості та якості інформації, якою вона володіє.

Тому перед сучасними підприємствами, організаціям та установами постає необхідність вирішення питань ефективного управління ІР в режимі реального часу. Насамперед, це стосується тих підприємств, які мають у своєму розпорядженні значну кількість одиниць ресурсів різного роду, які перебувають в роботі одноразово, виконують безліч операцій на протязі дня, що реалізуються на істотних територіях, наприклад, на рівні національного масштабу, та орієнтовані на задоволення замовлень і вимог різного плану. Ефективне та своєчасне вирішення виникаючих завдань для таких підприємств є досить важливим, тому без застосування автоматизованих управлінських систем, ці підприємства не здатні розвиватися, вирішувати завдання, що постають перед ними, бути конкурентоспроможними і ефективними. Отже, перед нашою державою стоїть важливе завдання – удосконалення процесу використання наявних і виробництва нових ІР, розробка дієвих методик управління ІР і забезпечення інформаційної безпеки [6].

Рішення визначених задач вимагає розробки нових моделей і методів, алгоритмів та програмних

засобів, які дадуть можливість оперативно створювати, аналізувати і гнучко перебудовувати ІР в режимі реального часу. Це передбачає автоматичну оперативну реакцію на незаплановані події з можливістю підбору або заміною ІР (наприклад, термінове замовлення, форс-мажорні ситуації, незаплановані ремонтні роботи, різні відмови з боку інфраструктури). Одночасно повинно враховуватись сила різноманітних критеріїв: максимальна швидкість виконання замовлення, мінімальний холостий пробіг, рівномірне завантаження ресурсів, мінімальні ризики зриву термінів замовлень тощо.

Питанням дослідження теоретичних і практичних аспектів управління інформаційними ресурсами підприємств присвячено публікації таких вчених, як Буряк В.В., Василик М.А., Годин В.В., Корнеев І.К., Літнарович Р.М., Мартинюк П.М., Пономаренко В.С., Павленко Л.А., Сіміонов Ю.Ф., Татарчук М.І., Гушко С.В., Шквір В.Д. та ін.

Розвиток систем штучного інтелекту (ШІ), методів об'єктно-орієнтованого програмування, мережевих технологій призвели до виникнення мультиагентного підходу. Значний внесок у розвиток теорії і практики мультиагентних систем та технологій внесли такі зарубіжні автори, як К. Лангтон, Р. Аксельрод, М. Вулдрідж, Н. Дженнінгс, Р. Хаммонд, Дж. Фербер, В.Б. Тарасов, В.І. Городецький, Д.А. Поспелов, О.Н. Гранічін, П.О. Скобелєв та ін. Однак, в умовах розвитку сучасного інформаційного простору дослідження організаційних і технічних аспектів сучасної інформаційно-комунікаційної сфери управління інформаційними ресурсами підприємства лишаються досить актуальними.

**Постановка задачі.** Нова ера телекомунікаційних та інформаційних технологій ознаменована великими обсягами даних, хмарними обчисленнями (cloud-computing), використанням інформаційних мереж і мобільних технологій, змінами традиційних парадигм бізнесу. З одного боку, обчислювальні комплекси та системи постачальників, замовників та інших підприємств генерують більше даних, ніж будь-коли раніше, а з іншого, соціальні мережі та мобільні технології дали можливість користувачам та співробітникам миттєво ділитися своїми думками он-лайн, обмінюватись даними.

Сучасні підприємства є складними динамічними системами, що розвиваються в часі, включають велику кількість елементів, реалізують виробничі та управлінські функції, мають багаторівневу структуру, велику кількість зовнішніх та внутрішніх інформаційних зав’язків. Саме тому зростає важливість комплексного підходу до автоматизації інформаційних процесів на підприємствах. Ефективність яких, в першу чергу, залежить від того, наскільки широко вона охоплює комплекси розрахунків, проведених в управлінні [1].

В результаті таких значних змін підприємства повинні переглядати свої бізнес-позиції: бізнес-стратегія і інновація повинні починатися з постановки питань, які можуть покращити бізнес сьогодні. Інформаційні технології обробки даних в режимі реального часу сприяють поліпшенню бізнес-процесів, орієнтованих на майбутнє, інноваційні послуги і удосконалення процедури прийняття рішень. Розвивати і впроваджувати потрібно не просто автоматизовані системи, а нові стратегії, що будуть відповідати всім потребам майбутнього, будуть готові використовувати нові можливості, які пропонують великі обсяги даних, хмарні обчислення, мобільні технології і соціальні мережі [7].

Додатки, що працюють в реальному часі та використовують технології обчислення в оперативній пам'яті, підвищують продуктивність та дозволяють підприємствам:

- трансформувати бізнес швидше: впроваджувати інноваційні продукти і послуги;
- досягати найвищої продуктивності: приймати правильні рішення і реагувати швидше на потреби клієнта;
- керувати більш ефективно: здійснювати поточні справи швидше, краще і з найменшими витратами.
- Такі рішення є основою для використання баз даних (транзакційних, аналітичних, мобільних, вбудованих) та створюють революційні можливості для більш ефективного управління підприємством [1, 8]:
- бізнес-аналітика заснована на даних, що надходять в реальному часі, дозволяє підприємству вести бізнес більш оперативно;
- покращене керування процесом і легкий доступ до необхідної інформації дають можливість користувачам думати, планувати і управляти ефективніше;
- нові стратегії, засновані на актуальних даних, сприяють максимізації ринкових можливостей, зростанню інноваційних продуктів і послуг з одночасною мінімізацією ризиків завдяки більш прогнозованим змінам в поведінці/потребах клієнта;
- покращена ефективність ІТ: безпечне управління великими і складними обсягами даних.

У зв'язку з цим стає актуальним і значущим завдання розробки моделей, методів і засобів для створення систем управління інформаційними ресурсами підприємства на основі технології створення мультиагентних систем.

**Мета дослідження.** Основним завданням статті є розробка методів і засобів створення мультиагентних систем управління інформаційними ресурсами, що поєднують переваги класичного і мультиагентного підходів для планування ресурсів, розвитку інформаційно-комунікаційної взаємодії між користувачами, що формують і виконують плани в режимі реального часу.

**Виклад основного матеріалу дослідження**. Як показує досвід країн з розвинутою економікою та передовий вітчизняний досвід, ефективне управління великими підприємствами і корпораціями сьогодні неможливе без використання сучасних інформаційних технологій (ІТ). ІТ дозволяють застосовувати

ефективні методи управління, організації та планування, що охоплюють такі напрямки, як маркетинг, логістика, фінанси, виробництво із забезпеченням якості, збуту та післяпродажної підтримки (PLM – Product Lifecycle Management). Сучасні системи планування та управління ресурсами (матеріальними, фінансовими, трудовими) у межах корпорації (ERP – Enterprise Resource Planning) забезпечують виконання всіх основних функцій підприємства, незалежно від його роду діяльності, дозволяють менеджерам усіх рівнів управління приймати оптимальні рішення на основі повної і достовірної інформації у режимі «реального часу» в матеріальній сфері, фінансовому менеджменті та управлінні людськими ресурсами. Використання ERP-систем забезпечує конкурентоздатність бізнесу та дозволяє підвищувати його ефективність. Саме зміни в цих сферах дають змогу стверджувати, що економіка України вступає в нову епоху – інформаційну масово-персоніфіковану [2].

Управління сучасним бізнесом вимагає створення розподілених інтелектуальних систем нового покоління, що автоматизують процеси прийняття рішень, побудованих не як традиційні закриті, централізовані, монолітні і послідовні IT системи, а як цифрові платформи «штучного інтелекту» (ШІ) і екосистеми розумних сервісів, здатних до автономного, асинхронного і паралельного функціонування, миттєвої реакції на події, можливість планування і погодження своїх дій в умовах наявності суперечливих інтересів і обмежених ресурсів, контролю виконання намічених планів в реальному часі.

Сучасні підприємства використовують сучасні IT для стратегічного менеджменту (наприклад, DW (Data Warehouse) – сховища даних, BSC (Balanced Scorecard) – система збалансованих показників), технології, які відносять до класу інтелектуальних засобів підтримки бізнесу (BI – Business Intelligence система бізнес-аналітики для формування аналітичних звітів та оцінки бізнес-процесів). Максимальний ефект отримується при інтеграції всіх цих технологій, що і забезпечує підтримку всіх складових управління підприємствами (рис. 1).

Побудова принципово нового класу систем ШІ стає можливим на основі баз знань, мультиагентних систем і технологій, які забезпечують можливість створення систем, що самоорганізують управління ІР, в яких агенти працюють як одна команда і приймають рішення в консенсусі інтересів, витягають знання з досвіду, навчаються і еволюціонують [4].

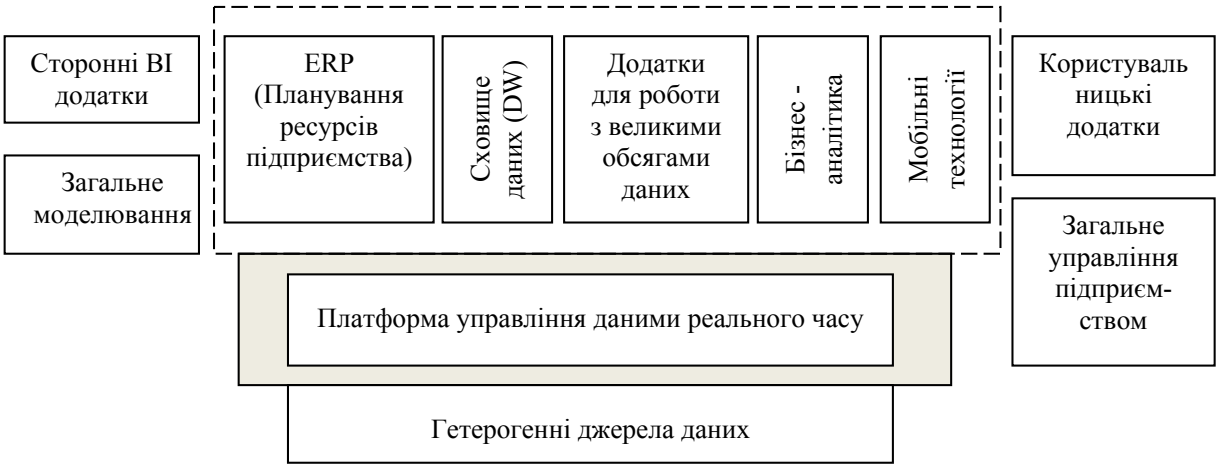



**Рис. 1. Структура системи управління ресурсами підприємства у режимі реального часу**

Розглянемо задачу управління мобільними ІР в реальному часі, до яких можна віднести такі як, наприклад, управління великими комплектними вантажоперевезеннями, дрібними міжміськими перевезеннями, сервісними та ремонтними бригадами, складанням і доставкою товарів з Інтернет-магазинів тощо.

Запропонований підхід до формалізації задач управління мобільними ІР на основі мультиагентних технологій дозволить створювати агентів з власними фітнес-функціями, забезпечувати їх спілкування між собою для поліпшення розкладу за згодою всіх сторін учасників. Суть цього підходу полягає в тому, щоб створювати власну унікальну мультиагентну модель для кожного конкретного підприємства, тому що не можливо мати одну модель для різних підприємств на всі випадки життя, так як їх бізнеси дуже різноманітні.

Завдання управління ІР підприємства досить складні та різноманітні за рахунок необхідності врахування особливостей предметної області для відповідних підприємств. Світовий досвід практичного вирішення таких завдань показує, що, вони можуть вирішуватися на єдиній методологічній основі віртуального підприємства і мультиагентного підходу [8].

Мультиагентна, або багатоагентна, система (МАС) будується як система агентів, які здійснюють взаємодію між собою [5]. Агент розглядається як комп'ютерна система що знаходиться в динамічному середовищі та здатна на автономні дії в цьому середовищі. Агенти є активними об'єктами, здатні сприймати ситуації, приймати рішення і спілкуватись з іншими агентами, знаходити варіанти рішень і узгоджувати їх між собою. Використання МАС дозволяє досягти більшої адаптивності і помилко стійкості в порівнянні з

традиційними системами.

МАС зазвичай складається з наступних основних компонентів: множина організаційних одиниць, серед яких виділяються: підмножина агентів, які маніпулюють підмножиною об'єктів; множина завдань; середовище, в якому існують агенти і об'єкти; множина відносин між агентами; множина дій агентів (наприклад, операцій над об'єктами). Таким чином МАС, у загальному вигляді, можна представити у вигляді множини з наступними елементами [1]: Агенти, Середовище, Зв'язки між Середовищем і Агентами:

$$\text{МАС} = \{\text{Агенти, Середовище, Зв'язки}\}.$$

Мультиагентна технологія моделювання інформаційних потоків описує потік у вигляді агента за допомогою множини:

$$\text{Агент} = \{C_i, \text{B, A, P, M}\},$$

де $C_i$ – множина змінних, що визначають ціль діяльності агента; B – уявлення про стан зовнішнього середовища; A – алгоритм поведінки агента; P – знання агента; M – механізм взаємодії агента с іншими агентами.

Так як кожен агент визначений локально, то він має неповне уявлення про стан зовнішнього середовища та стан інших агентів, окрім інформації про свою минулу діяльність. Тому ці знання повинні оновлюватися динамічно в процесі моделювання. Відповідно існує і безліч обмежень по взаємодії, які визначають відносини агента з іншими агентами. Тому в описі кожного агента повинно бути позначено тих агентів, з якими він може взаємодіяти, і для кожного вказано ставлення до цього агенту та характер угод, які регулюють їх взаємодії. Метою кожного агента є знаходження максимума заданої цільової функції $f(x)$ на заданій області B. Вся інформація про інших агентів, яка доступна без пересилання повідомлень контролюється в режимі реального часу політикою управління інформацією.

Середовище в якому взаємодіють агенти, можна представити у вигляді імітаційної моделі об'єкта моделювання. Отже середовище це множина: $S_i = \{\text{Стан}_i, \text{Процес}_i\}$.

Важливою особливістю є те, що середовище *Si* є активним, має свої внутрішні процеси, які можуть змінювати стан системи незалежно від тих агентів, що входять в МАС [5]. Для кожного конкретного підприємства необхідно створювати власну унікальну мультиагентну модель, оскільки бізнеси підприємств дуже різноманітні, але основні принципи розробки системи планування і оптимізації, загальний склад агентів і протоколів їх переговорів може бути близьким за своєю природою різних завдань.

Представлений підхід заснований на зіставленні замовленнями і ресурсів програмних агентів з їх інтересами, здатність реагувати на зміни складу замовлень і ресурсів, приймати рішення і взаємодіяти між собою для вирішення конфліктів і пошуку компромісів, що дозволяє знаходити узгоджені рішення і підтримувати баланс інтересів агентів в інтересах всієї системи [9].

В результаті взаємодії агентів і зміни станів відповідних замовлень і ресурсів досягається локально оптимальне рішення, яке далі в реальному часі під час вступу нових подій (нове замовлення, поломка, затримка тощо) знову коригується в реальному режимі без зупинки і перезапуску системи.

**Висновки**. Одним із засобів ефективного функціонування системи управління інформаційними ресурсами на основі мультиагентних технологій є раціональна організація спільної роботи агентів. Для цього слід визначити склад агентів, способи їх взаємодії, сценарії роботи агентів. Необхідно забезпечити можливість системі управління ІР постійно розвиватися і вдосконалюватися, розширювати коло вирішуваних ними завдань за рахунок проектування та розробки нових типів сценаріїв взаємодії і узгодження дій агентів.

**Література**

1. Берко А.Ю. Моделі та методи проектування інформаційних систем контент-електронної комерції / А.Ю. Берко, В.А. Висоцька // Інформаційні системи та мережі. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів 2008. – № 621. – С. 29–45.

2. Євтушенко О.В. Побудова моделі інтелектуального агента для інформаційно-керуючої системи енергетичного господарства підприємств харчової промисловості / О.В. Євтушенко, А.О. Сірик // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – Київ : НУХТ, 2016. – Том. 22, № 5. – С. 113–119.

3. Городецкий В. И. Многоагентные системы (обзор) [Електронний ресурс] / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов. – Режим доступу : http://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/3/.

4. Гороховський С. С. Агентні технології: спроба критичного огляду [Електронний ресурс] / Гороховський С. С. – Режим доступу : http://ekmair.ukma.edu.ua/bitstream/handle/123456789/10630/Horokhovs%27kyy_Ahentni_tekhnolohiyi_sproba.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

5. Коновалов О.Ю. Агентні технології у розподілених обчислювальних системах / О.Ю. Коновалов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 2(26). – С. 63–68.

6. Маслянко П.П. Інформаційні ресурси та засоби їх створення / П.П. Маслянко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля.– 2008.– Т. 1, № 7. – С. 132–140.

7. Огнєвий О.В. Особливості управління інформаційними ресурсами в корпоративних інформаційних системах / О.В. Огнєвий, А.М. Огнева, В.А. Коваль, В.В. Присяжнюк // Вісник Хмельницького Національного Університету серія: Технічні науки. – Хмельницький. – 2018. – № 5 (265). –

С. 17–21.

8. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития / П.О. Скобелев // Информационные технологии». – 2013. – № 1. – С. 1–32.

**References**

1. Berko A.Iu. Modeli ta metody proektuvannia informatsiinykh system kontent-elektronnoi komertsii / A.Iu. Berko, V.A. Vysotska // Informatsiini systemy ta merezhi. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». – Lviv 2008. – № 621. – S. 29–45.

2. Ievtushenko O.V. Pobudova modeli intelektualnoho ahenta dlia informatsiino-keruiuchoi systemy enerhetychnoho hospodarstva pidpryiemstv kharchovoi promyslovosti / O.V. Yevtushenko, A.O. Siryk // Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii. – Kyiv : NUKhT, 2016. – Tom. 22, № 5. – S. 113–119.

3. Gorodeckij V. I. Mnogoagentnye sistemy (obzor) [Elektronnij resurs] / V. I. Gorodeckij, M. S. Grushinskij, A. V. Habalov. – Rezhim dostupu : http://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/3/.

4. Horokhovskyi S. S. Ahentni tekhnolohii: sproba krytychnoho ohliadu [Elektronnyi resurs] / Horokhovskyi S. S. – Rezhym dostupu : http://ekmair.ukma.edu.ua/bitstream/handle/123456789/10630/Horokhovs%27kyy_Ahentni_tekhnolohiyi_sproba.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

5. Konovalov O.Iu. Ahentni tekhnolohii u rozpodilenykh obchysliuvalnykh systemakh / O.Iu. Konovalov // Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku. – 2013. – № 2(26). – S. 63–68.

6. Maslianko P.P. Informatsiini resursy ta zasoby yikh stvorennia / P.P. Maslianko // Visn. Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalia.– 2008.– T. 1, № 7. – S. 132–140.

7. Ohnievyi O.V. Osoblyvosti upravlinnia informatsiinymy resursamy v korporatyvnykh informatsiinykh systemakh / O.V. Ohnievyi, A.M. Ohneva, V.A. Koval, V.V. Prysiazhniuk // Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu seriia: Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi. – 2018. – № 5 (265). – S. 17–21.

8. Skobelev P.O. Intellektualnye sistemy upravleniya resursami v realnom vremeni: principy razrabotki, opyt promyshlennyh vnedrenij i perspektivy razvitiya / P.O. Skobelev // Informacionnye tehnologii». – 2013. – № 1. – S. 1–32.

Рецензія/Peer review : 28.5.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. О.А. Мясіщев

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-111-120
УДК 621.396.12

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, А.О. ЛЮЛЬЧУК
Хмельницький національний університет

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ БЛОКОВИХ КОДІВ В УМОВАХ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ КОДУ, ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ

*Стаття присвячена дослідженню завадостійкості блокових коректувальних кодів в системам зв'язку з двійковою фазовою модуляцією ФМ-2 при їх декодуванні в умовах впливу зміни швидкості блокових кодів, швидкості передачі цифрових потоків інформації та температури навколишнього середовища. Проведено дослідження завадостійкості блокових коректувальних кодів, призначених для використання в сучасних телекомунікаційних системах. Проаналізовано введення надмірності при кодуванні блокових кодів на зміну витрат смуги частот на передавання кодованих сигналів та знаходження ймовірності бітової помилки при декодуванні циклічних кодів у двійковому симетричному каналі. Проведені розрахунки щодо визначення необхідного співвідношення сигнал/шум, мінімально та максимально допустимої потужності сигналу на вході приймача при швидкості передачі цифрових потоків інформації 5 Мбіт/с, 100 Мбіт/с та 500 Мбіт/с, які забезпечують високу якість зв'язку в межах ймовірності бітової помилки $10^{-7}$-$10^{-9}$. Надані науково обґрунтовані висновки щодо завадостійкого використання блокових кодів в телекомунікаційних системах в умовах зміни швидкості блокових кодів, швидкості передачі даних, температури навколишнього середовища та дії завад.*

*Ключові слова: блокові коди, завадостійкість, швидкість блокових кодів, швидкість передачі цифрової інформації, співвідношення сигнал/шум, ймовірність бітової помилки.*

V.I. LUZHANSKIY, L.V. KARPOVA, A.O. LYULCHUK
Khmelnytskyi National University

## RESEARCH NOISE IMMUNITY OF BLOCK CODES IN THE CONDITIONS OF CHANGE OF CODES SPEED, SPEED OF DIGITAL FLOWS OF INFORMATION AND ENVIRONMENTAL TEMPERATURE FOR PROVISION OF PROVIDED COMMUNICATION QUALITY

*The article is devoted to the study of noise immunity of block correction codes in communication systems with PM-2 binary phase modulation when they are decoded under the influence of changes in the speed of block codes, the transmission speed of digital information streams and the ambient temperature. Research of the noise immunity of block correction codes for use in modern telecommunication systems has been conducted. Analysed the introduction of redundancy when coding block codes to change the cost of the frequency band for transmitting coded signals and finding the probability of bit error when decoding cyclic codes in a binary symmetric channel. Carried out calculations to determine the required signal-to-noise ratio, the minimum and maximum allowable signal power at the receiver input at a transmission rate of digital information streams of 5 Mbit/s, 100 Mbit/s and 500 Mbit/s, which ensure high quality of communication within the probability of bit error $10^{-7}$ - $10^{-9}$. Research was conducted to determine the required signal-to-noise ratio, the minimum and maximum allowable signal power at the receiver input at a transmission rate of 500 Mbit/s when the ambient temperature changes, which provide high quality information transmission with a bit error rate of $10^{-7}$ - $10^{-9}$. Provided scientifically-based conclusions regarding the robust use of block codes in telecommunications systems in the face of changes in the rate of block codes, data transfer rate, ambient temperature and the effect of interference.*

*Keywords: block codes, noise immunity, block code speed, digital rate of transmission, signal/noise ratio, bit error rate.*

## Вступ

В сучасних телекомунікаційних системах інформація, як правило, передається в цифровому виді й обробляється цифровими методами. При цьому важливу роль відіграють методи завадостійкого кодування інформації. Підвищення швидкості передачі цифрової інформації вимагає від телекомунікаційних систем високої завадостійкості при відповідному співвідношенні сигнал/шум на вході приймача та ймовірності бітової помилки для забезпечення заданої якості зв'язку.

**Аналіз стану досліджень та публікацій**. Аналіз літературних джерел ([1–4] та ін.) показує недостатність проведених досліджень у цьому напрямку.

Метою даної роботи є дослідження завадостійкості блокових кодів в умовах зміни швидкості коду, швидкості передачі цифрових потоків інформації та температури навколишнього середовища для забезпечення заданої якості зв'язку.

**Результати дослідження.** Знайдемо ймовірність бітової помилки помилки при декодуванні блокових кодів у двійковому симетричному каналі. Для цього розглянемо кодування блоковим кодом ( $n$ – кількість символів (знаків) у кодовій комбінації; $k$ – кількість інформаційних символів) з кодовою відстанню $d_{\min}$. У такому каналі помилки в послідовно переданих кодових символах відбуваються незалежно з імовірністю $p$. Тоді ймовірність того, що на довжині блоку $n$ відбудеться $q$ помилок, дорівнює [1, 2]:

$$P(q) = C_n^q p^q (1-p)^{n-q}, \quad (1)$$

де $C_n^q$ – число сполучень із $n$ елементів по $q$. Якщо код виправляє всі помилки кратності

$q_{випр} = (d_{\min} - 1)/2$ ($d_{\min}$ – непарна) і менш, то ймовірність одержання на виході декодера блоку з невиправленими помилками визначається за формулою:

$$P_{n.д.} \le \sum_{q=q_{випр}+1}^{n} P(q) \tag{2}$$

Отже, імовірність помилкового декодування блоку буде розраховуватись:

$$P_{n.д.} \le \sum_{q=q_{випр}+1}^{n} C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \tag{3}$$

У цьому виразі рівність має місце, за умовою використання досконалого коду. Співвідношення між параметрами $n$, $k$ і $q_{випр}$ визначаються конкретним обраним кодом. Вираз (3) дозволяє знайти верхню оцінку ймовірності помилки декодування блоку при використанні блокових кодів у двійковому симетричному каналі без пам'яті. Для визначення ймовірності помилки в кожному інформаційному (або додатковому) символі необхідно знати використовуваний алгоритм декодування й структуру коректувального коду, зокрема, набір відстаней від переданої кодової комбінації до всіх дозволених комбінацій. Для розрахунків імовірності помилкового декодування кодових символів (інформаційних або додаткових) використовують наближену формулу [3]:

$$p_д = \frac{d_{\min}}{n} \sum_{q=q_{випр}+1}^{n} C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \tag{4}$$

Для каналів з когерентним прийманням сигналів двійкової фазової модуляції (ФМ-2) імовірність бітової помилки сигналу розраховують за формулою:

$$p = Q(\sqrt{2}h_s), \tag{5}$$

де $h_s^2 = E_s/N_0$ – відношення енергії двійкового сигналу $E_s$ до спектральної густини потужності шуму $N_0$ на вході демодулятора;

$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-\frac{t^2}{2})dt$ – гаусова $Q$-функція, таблиці значень якої містять довідники з теорії ймовірностей і статистичних розрахунків.

Введення надмірності при використанні коректувального кодування призводить до розширення смуги частот, зайнятої сигналом. Так, якщо смуга частот у системі без кодування становила $\Delta F_S$ (Гц), то застосування коду зі швидкістю $R_{код} = k/n$ вимагає розширення смуги частот до величини:

$$F_{код} = \frac{\Delta F_S}{R_{код}}, \tag{6}$$

тобто відбувається розширення смуги частот у $K_F = n/k$ раз. Для кодів з низькою швидкістю ($n/k \gg 1$) таке розширення може виявитися відчутним. Тому задача вибору коду при проектуванні телекомунікаційної системи полягає в пошуку компромісу між бажаними ступенем підвищення завадостійкості й неминучим розширенням смуги частот кодованого сигналу.

Аналіз результатів розрахунків імовірності бітової помилки декодування за формулами (4) і (5) дозволяє зробити висновки щодо ефективності застосування завадостійкого кодування [1]:

1. З ростом довжини кодової комбінації *n* імовірність бітової помилки декодування $p_д$ знижується.

2. Коди з великою надмірністю (малою швидкістю коду $R_{код}$) забезпечують суттєве зниження ймовірності помилки декодування.

3. При використанні коректувальних кодів у телекомунікаційних системах платою за підвищення завадостійкості є розширення смуги частот переданого сигналу, обумовлене надмірністю, що вводиться при кодуванні, у

$$K_F = n/k \text{ раз.} \tag{7}$$

Важливим є завдання доцільності застосування коректувальних кодів для підвищення завадостійкості передавання інформації каналами телекомунікаційних систем.

Введення надмірності при кодуванні змінює витрати смуги частот на передавання кодованих сигналів, вимагаючи при цьому урахування надмірності при виконанні енергетичних розрахунків. Згідно з формулою (5) імовірність бітової помилки канальних сигналів (кодових символів) визначається їхньою енергією $E_S$, що з урахуванням надмірності коду витрачається менше енергії $E_б$ на передавання одного інформаційного символу (біта). Це отримується з рівності $kE_б = nE_S$, тобто $E_S = E_б R_{код}$. У всіх енергетичних розрахунках систем з кодуванням використовують величину відношення енергії сигналу,

затрачуваної на передавання одного інформаційного двійкового символу (біта) до спектральної густини потужності шуму $E_б / N_0$ . Імовірність помилкового декодування блоку розраховується за формулами (3) і (4), у яких в аргумент функції $Q(z)$ входить величина $E_s$ – енергія сигналу, яка витрачається на передавання каналом одного кодового символу. При кодуванні зі швидкістю $R_{код} = k/n$ енергія сигналу може бути представлена як $E_s = E_б R_{код}$ , де $E_б$ – енергія сигналу, яка витрачається на передавання одного двійкового інформаційного символу (біта). Отже, відношення енергії $E_б$ до спектральної густини потужності шуму $N_0$ можна позначити як $h_б^2 = E_б / N_0$ , яке використовується в енергетичних розрахунках телекомунікаційних систем. Враховуючи взаємозв'язок енергії сигналу $E_s$ і енергії $E_б$ величина, що входить у розрахункову формулу (5), буде $h^2 = R_{код} h_б^2$ .

Тоді з урахуванням витрат енергії на передавання додаткових символів надлишкового коду формулу (5) можна записати так:

$$p = Q(\sqrt{2R_{код}} h_б), \tag{8}$$

на основі чого ймовірність помилкового декодування біта може бути оцінена виразом:

$$p_д = \frac{d_{\min}}{n} \sum_{q=q_{випр}+1}^{n} C_n^q p^q (1-p)^{n-q}, \tag{9}$$

у якому ймовірність помилки канального сигналу розраховується за формулою (8). При необхідності визначити ймовірність бітової помилки в каналі без кодування можна скористатися формулою (8), визначивши $R_{код} = 1$ :

$$p = Q(\sqrt{2} h_б). \tag{10}$$

Використаємо формулу (10) для розрахунку імовірності бітової помилки оптимального приймання сигналів ФМ-2 у каналі без кодування. Результати розрахунків подані у табл. 1. Вихідним параметром для розрахунків є відношення сигнал/шум на вході демодулятора $h_б^2 = E_б / N_0$ . Зв'язок між величиною $h_{бдБ}^2$ обраховується за формулою $h_{бдБ}^2 = 10 \lg h_б^2$ . У табл. 1 наведені розрахункові дані з визначення ймовірності бітової помилки оптимального приймання сигналу ФМ-2 (9) та аргумент $z$ функції $Q(z)$ .

Таблиця 1

**Розрахунок завадостійкості приймання сигналу ФМ-2**

| $h_б^2$ , дБ | $h_б$ | $R_{код}$ | $z$ | $p$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,122 | 1 | 1,587 | $5{,}7 \cdot 10^{-2}$ |
| 2 | 1,259 | 1 | 1,780 | $3{,}7 \cdot 10^{-2}$ |
| 3 | 1,413 | 1 | 1,998 | $2{,}3 \cdot 10^{-2}$ |
| 4 | 1.585 | 1 | 2,241 | $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ |
| 5 | 1,778 | 1 | 2,515 | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| 6 | 1,995 | 1 | 2,822 | $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ |
| 7 | 2,239 | 1 | 3,166 | $7{,}9 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 2,512 | 1 | 3,552 | $1{,}9 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 2,818 | 1 | 3,986 | $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ |
| 10 | 3,162 | 1 | 4,472 | $3{,}9 \cdot 10^{-6}$ |
| 11 | 3,548 | 1 | 5,018 | $2{,}7 \cdot 10^{-7}$ |
| 12 | 3,981 | 1 | 5,630 | $9 \cdot 10^{-9}$ |

Крива залежності $p = f(h_б^2)$ , яка побудована за даними (ФМ-2) табл. 1, наведена на рис. 1.

Визначимо потужність сигналу на вході приймача:

$$P_c = 10^{0.1 \cdot p_c}, \tag{11}$$

де $P_c$ – потужність сигналу на вході приймача, Вт; $p_c$ – задана потужність на вході приймача, дБВт.

Тривалість тактового інтервалу(тривалість одного біту)дорівнює:

$$T = 1 / R, \tag{12}$$

де $R$ – швидкість передачі цифрової інформації.

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається за наступною формулою:

$$E_b = P_c \cdot T. \tag{13}$$

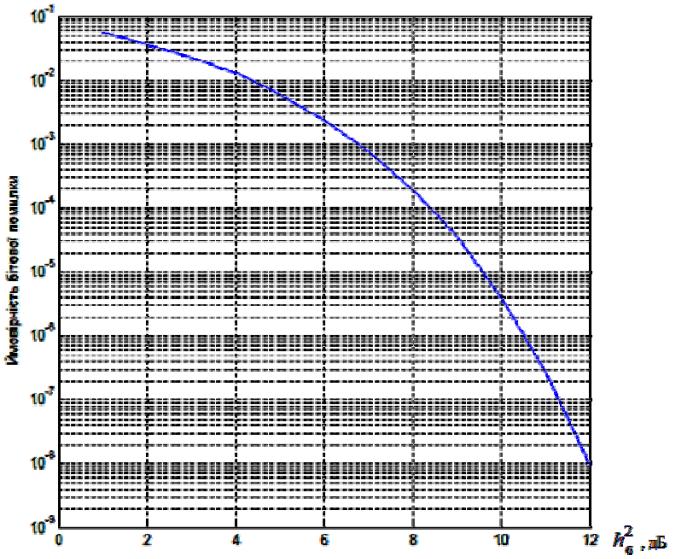



**Рис. 1. Завадостійкість декодування циклічних кодів**

Потужність шумів на вході приймача можна визначити по формулі [4] :

$$P_{ш.пр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{пр}, \tag{14}$$

де $n$ – коефіцієнт шуму приймача ($n = 10\,дБ$); $k = 1.38 \cdot 10^{-23}\ Вт/Гц \cdot град$ – стала Больцмана; $T_0 = 293\ K$ – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{пр}$ – ширина смуги пропускання приймача.

Одностороння спектральна щільність потужності білого шуму:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0, \tag{15}$$

що дозволяє записати:

$$N_0 = k \cdot T_0 + n = -203.933 + 10 = -193.933\ \frac{дБ \cdot Вт}{Гц}. \tag{16}$$

Отриманий результат запишемо у вигляді:

$$N_0 = 10^{-19.393} = 4.043 \cdot 10^{-20}\ \frac{Вт}{Гц}. \tag{17}$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача визначається як:

$$E_b / N_0. \tag{18}$$

Ймовірність бітової помилки можна отримати за формулою:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right). \tag{19}$$

Визначимо ймовірність бітової помилки в системам мобільного зв'язку з фазовою маніпуляцією ФМ-2 BPSK (binary phase-shift keying – двійкова фазова маніпуляція) для забезпечення високої якості зв’язку в межах ймовірності бітової помилки $10^{-7}$ - $10^{-9}$ .

Для швидкості передачі цифрової інформації $R$=5 Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c.max}$) на вході приймача, яка забезпечує ймовірність бітової помилки $10^{-9}$ .

Знаходимо Q-функцію [4] для ймовірності помилки $10^{-9}$ (Q(6)). За формулою (19) знаходимо значення $E_b = 7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж$.

Тривалість тактового інтервалу імпульсу дорівнює: $T = 1/R = 1/5 \cdot 10^6\ біт/с = 2 \cdot 10^{-7}\ с.$

За формулами (11) та (13) визначимо $p_{c.max}$.

$$p_{c.\max} = \frac{E_b}{T} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж}{2 \cdot 10^{-7}\ с} = 3.639 \cdot 10^{-12}\ Вт = -114.39\ дБВт.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності сигналу на вході приймача при ймовірності бітової помилки $10^{-7}$ (Q(5.2)) [4].

$$p_{c.\min} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19}\ Дж}{2 \cdot 10^{-7}\ с} = 2.733 \cdot 10^{-12}\ Вт = -115.633\ дБВт.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c.max}$ = -114.39 дБВт; $p_{c.min}$ = -115.633 дБВт).

Розрахуємо значення потужностей сигналу на вході приймача:

$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-114.39)} = 3.639 \cdot 10^{-12}\ Вт.$ $P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-114.528)} = 3.525 \cdot 10^{-12}\ Вт.$

$P_{c3} = 10^{0.1\cdot(-114.666)} = 3.415\cdot10^{-12}\ Bm.$ $P_{c4} = 10^{0.1\cdot(-114.804)} = 3.308\cdot10^{-12}\ Bm.$

$P_{c5} = 10^{0.1\cdot(-114.943)} = 3.204\cdot10^{-12}\ Bm.$ $P_{c6} = 10^{0.1\cdot(-115.081)} = 3.104\cdot10^{-12}\ Bm.$

$P_{c7} = 10^{0.1\cdot(-115.219)} = 3.007\cdot10^{-12}\ Bm.$ $P_{c8} = 10^{0.1\cdot(-115.357)} = 2.913\cdot10^{-12}\ Bm.$

$P_{c9} = 10^{0.1\cdot(-115.495)} = 2.822\cdot10^{-12}\ Bm.$ $P_{c10} = 10^{0.1\cdot(-115.633)} = 2.733\cdot10^{-12}\ Bm.$

$P_{c1} = P_{c.\max} = 3.639\cdot10^{-12}\ Bm.$ $P_{c10} = P_{c.\min} = 2.733\cdot10^{-12}\ Bm.$

Тривалість одного біта дорівнює $T_1 = 2\cdot10^{-7}\ c.$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта, розраховується наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1}\cdot T_1 = 3.639\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 7.278\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b2} = P_{c2}\cdot T_1 = 3.525\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 7.05\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b3} = P_{c3}\cdot T_1 = 3.415\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 6.83\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b4} = P_{c4}\cdot T_1 = 3.308\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 6.616\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b5} = P_{c5}\cdot T_1 = 3.204\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 6.409\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b6} = P_{c6}\cdot T_1 = 3.104\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 6.208\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b7} = P_{c7}\cdot T_1 = 3.007\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 6.014\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b8} = P_{c8}\cdot T_1 = 2.913\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 5.826\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b9} = P_{c9}\cdot T_1 = 2.822\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 5.643\cdot10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b10} = P_{c10}\cdot T_1 = 2.733\cdot10^{-12}\ Bm\cdot 2\cdot10^{-7}\ c = 5.467\cdot10^{-19}\ Дж.$$

Потужність шумів на вході приймача :

$$N_0 = 10^{-19.393} = 4.043\cdot10^{-20}\ \frac{Bm}{Гц}.$$

Знайдемо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{7.278\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 18.$ $\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{7.05\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 17.437.$

$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{6.83\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 16.891.$ $\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{6.616\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 16.362.$

$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{6.409\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 15.85.$ $\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{6.208\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 15.354.$

$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{6.014\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 14.873.$ $\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{5.826\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 14.408.$

$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{5.643\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 13.957.$ $\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{5.467\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Bm/Гц} = 13.52.$

Визначимо ймовірність бітової помилки:

$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot7.278\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(6) = 0.987\cdot10^{-9}.$ $P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot7.05\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.9) = 0.182\cdot10^{-8}.$

$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.83\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.8) = 0.312\cdot10^{-8}.$ $P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.616\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.7) = 0.533\cdot10^{-8}.$

$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.409\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.6) = 0.901\cdot10^{-8}.$ $P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.208\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.5) = 0.151\cdot10^{-7}.$

$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.014\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.4) = 0.252\cdot10^{-7}.$ $P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot5.826\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.3) = 0.416\cdot10^{-7}.$

$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot5.643\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.646\cdot10^{-7}.$ $P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot5.467\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.996\cdot10^{-7}.$

Таблиця 2

**Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 5 Мбіт/с**

| Ймовірність бітової помилки, $10^{-8}$ | 0.0987 | 0.182 | 0.312 | 0.533 | 0.901 | 1.512 | 2.518 | 4.161 | 6.459 | 9.964 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Потужність сигналу на вході приймача, дБВт | -114.3 | -114.5 | -114.6 | -114.8 | -114.9 | -114.0 | -115.2 | -115.3 | -115.4 | -115.6 |
| Співвідношення сигнал/шум, $E_b/N_0$ | 18 | 17.437 | 16.891 | 16.362 | 15.85 | 15.354 | 14.473 | 14.408 | 13.957 | 13.52 |

У відповідності до даних табл. 2 побудуємо графік залежності значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача (рис. 2).

Для швидкості передачі $R$=100 Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c.\max}$) на вході приймача, яка забезпечує ймовірність бітової помилки $10^{-9}$.

Знаходимо Q-функцію [4] для ймовірності помилки $10^{-9}$ (Q(6)). За формулою (19) знаходимо значення $E_b = 7.278 \cdot 10^{-19}$ *Дж*.

Тривалість тактового інтервалу імпульсу дорівнює: $T = 1/R = 1/100 \cdot 10^6$ *біт* $/ c = 1 \cdot 10^{-8}$ *с*.

За формулами (11) та (13) визначимо $p_{c.\max}$.

$$p_{c.\max} = \frac{E_b}{T} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж}{1 \cdot 10^{-8} c} = 7.278 \cdot 10^{-11}\ Вт = -101.38\ дБВт.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки $10^{-7}$ (Q(5.2)) [4].

$$p_{c.\min} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19}\ Дж}{1 \cdot 10^{-8} c} = 5.467 \cdot 101\ Вт = -102.623\ дБВт.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c.\max}$ = -101.38 дБВт; $p_{c.\min}$ = -102.623 дБВт).

Розрахуємо значення потужностей сигналу на вході приймача:

$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-101.38)} = 7.278 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-101.518)} = 7.05 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-101.656)} = 6.83 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-101.794)} = 6.616 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-101.932)} = 6.409 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-102.07)} = 6.208 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-102.208)} = 6.014 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-102.347)} = 5.826 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-102.485)} = 5.643 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-102.623)} = 5.467 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c1} = P_{c.\max} = 7.278 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.
$P_{c10} = P_{c.\min} = 5.467 \cdot 10^{-11}$ *Вт*.

Тривалість одного біта дорівнює $T_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ *с*.

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта розраховується наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_2 = 7.278 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_2 = 7.05 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 7.05 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_2 = 6.83 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 6.83 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_2 = 6.616 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 6.616 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_2 = 6.409 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 6.409 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_2 = 6.208 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 6.208 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_2 = 6.014 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 6.014 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_2 = 5.826 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 5.826 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_2 = 5.643 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 5.643 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$
$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_2 = 5.467 \cdot 10^{-11}\ Вт \cdot 1 \cdot 10^{-8} c = 5.467 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.393} = 4.043 \cdot 10^{-20}\ \frac{Вт}{Гц}.$$

Знайдемо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 18. \qquad \frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{7.05 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 17.437.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0}=\frac{6.83\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=16.891.\qquad \frac{E_{b4}}{N_0}=\frac{6.616\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=16.362.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0}=\frac{6.409\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=15.85.\qquad \frac{E_{b6}}{N_0}=\frac{6.208\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=15.354.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0}=\frac{6.014\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=14.473.\qquad \frac{E_{b8}}{N_0}=\frac{5.826\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=14.408.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0}=\frac{5.643\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=13.957.\qquad \frac{E_{b10}}{N_0}=\frac{5.467\cdot10^{-19}\ Дж}{4.043\cdot10^{-20}\ Вт/Гц}=13.52.$$

Розрахуємо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot7.278\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(6)=0.987\cdot10^{-9}.\qquad P_{b2}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot7.05\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.905)=0.182\cdot10^{-8}.$$

$$P_{b3}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.83\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.812)=0.312\cdot10^{-8}.\qquad P_{b4}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.616\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.712)=0.533\cdot10^{-8}.$$

$$P_{b5}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.409\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.63)=0.901\cdot10^{-8}.\qquad P_{b6}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.208\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.541)=0.151\cdot10^{-7}.$$

$$P_{b7}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot6.014\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.454)=0.252\cdot10^{-7}.\qquad P_{b8}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot5.826\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.368)=0.416\cdot10^{-7}.$$

$$P_{b9}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot5.643\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.283)=0.646\cdot10^{-7}.\qquad P_{b10}=Q\left(\sqrt{\frac{2\cdot5.467\cdot10^{-19}}{4.043\cdot10^{-20}}}\right)=Q(5.2)=0.996\cdot10^{-7}.$$

Таблиця 3

**Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 100 Мбіт/с**

| Ймовірність бітової помилки, $10^{-8}$ | 0.0987 | 0.182 | 0.312 | 0.533 | 0.901 | 1.512 | 2.518 | 4.161 | 6.459 | 9.964 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Потужність сигналу на вході приймача, дБВт | -101.3 | -101.5 | -101.6 | -101.7 | -101.9 | -102.0 | -102.2 | -102.3 | -102.4 | -102.6 |
| Співвідношення сигнал/шум, $E_b/N_0$ | 18 | 17.437 | 16.891 | 16.362 | 15.85 | 15.354 | 14.473 | 14.408 | 13.957 | 13.52 |

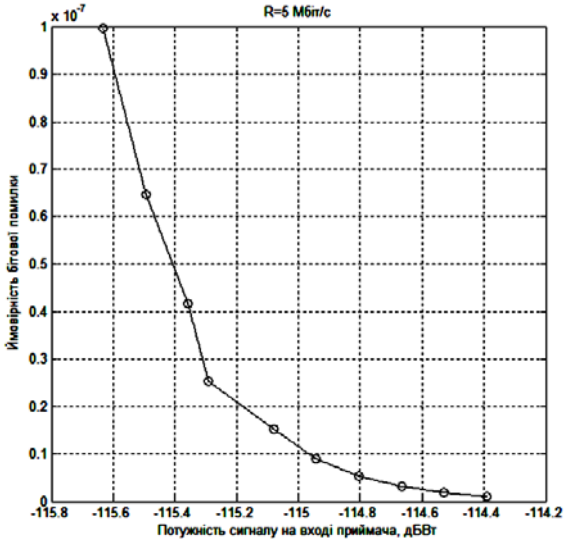



**Рис. 2. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача**

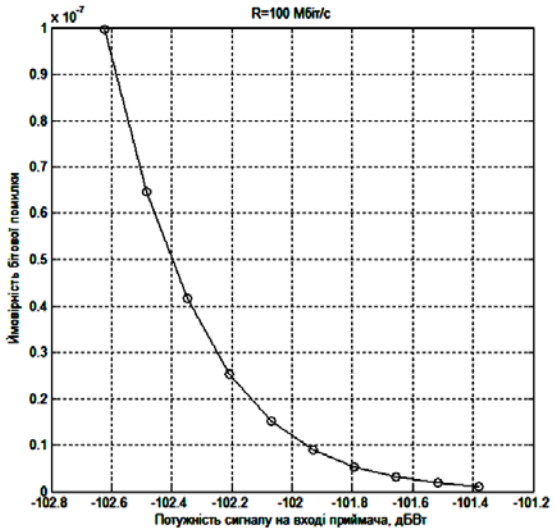



**Рис. 3. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача**

У відповідності до даних табл. 3 побудуємо графік залежності значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача (рис. 3).

Для швидкості передачі $R$=500 Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c.\max}$) на вході приймача, яка забезпечує ймовірність бітової помилки $10^{-9}$.

Знаходимо Q-функцію [4] для ймовірності помилки $10^{-9}$ (Q(6)). За формулою (19) знаходимо значення $E_b = 7.278 \cdot 10^{-19}$ *Дж*.

Тривалість тактового інтервалу імпульсу дорівнює: $T = 1/R = 1/500 \cdot 10^6$ *біт* $/ c = 2 \cdot 10^{-9}$ *с*.

За формулами (11) та (13) визначимо $p_{c.\max}$:

$$p_{c.\max} = \frac{E_b}{T} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж}{2 \cdot 10^{-9}\ c} = 3.639 \cdot 10^{-10}\ Вт = -94.39\ дБ\ Вт.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки $10^{-7}$ (Q(5.2)) [4]:

$$p_{c.\min} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19}\ Дж}{2 \cdot 10^{-9}\ c} = 2.733 \cdot 10^{-10}\ Вт = -95.633\ дБ\ Вт.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c.\max}$ = -94.39 дБВт; $p_{c.\min}$ = -95.633 дБВт).

Розрахуємо значення потужностей сигналу на вході приймача:

$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-94.39)} = 3.639 \cdot 10^{-10}\ Вт.$ $P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-94.528)} = 3.525 \cdot 10^{-10}\ Вт.$

$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-94.666)} = 3.415 \cdot 10^{-10}\ Вт.$ $P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-94.804)} = 3.308 \cdot 10^{-10}\ Вт.$

$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-94.943)} = 3.204 \cdot 10^{-10}\ Вт.$ $P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-95.081)} = 3.104 \cdot 10^{-10}\ Вт.$

$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-95.219)} = 3.007 \cdot 10^{-10}\ Вт.$ $P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-95.357)} = 2.913 \cdot 10^{-10}\ Вт.$

$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-95.495)} = 2.822 \cdot 10^{-10}\ Вт.$ $P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-95.633)} = 2.733 \cdot 10^{-10}\ Вт.$

$P_{c1} = P_{c.\max} = 3.639 \cdot 10^{-10}\ Вт.$ $P_{c10} = P_{c.\min} = 2.733 \cdot 10^{-10}\ Вт.$

Тривалість одного біта, дорівнює $T_3 = 2 \cdot 10^{-9}$ *с*.

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_3 = 3.639 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_3 = 3.525 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 7.05 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_3 = 3.415 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 6.83 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_3 = 3.308 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 6.616 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_3 = 3.204 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 6.409 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_3 = 3.104 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 6.208 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_3 = 3.007 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 6.014 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_3 = 2.913 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 5.826 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_3 = 2.822 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 5.643 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_3 = 2.733 \cdot 10^{-10}\ Вт \cdot 2 \cdot 10^{-9}\ c = 5.467 \cdot 10^{-19}\ Дж.$$

Потужність шумів на вході приймача :

$$N_0 = 10^{-19.3933} = 4.043 \cdot 10^{-20}\ \frac{Вт}{Гц}.$$

Знайдемо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 18.$ $\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{7.05 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 17.437.$

$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{6.83 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 16.891.$ $\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{6.616 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 16.362.$

$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{6.409 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 15.85.$ $\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{6.208 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 15.354.$

$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{6.014 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 14.473.$ $\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{5.826 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 14.408.$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{5.643 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт / Гц} = 13.957. \qquad \frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19}\ Дж}{4.043 \cdot 10^{-20}\ Вт / Гц} = 13.52.$$

Визначимо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.278 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(6) = 0.987 \cdot 10^{-9}. \qquad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.05 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.905) = 0.182 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.83 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.812) = 0.312 \cdot 10^{-8}. \qquad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.616 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.712) = 0.533 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.409 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.63) = 0.901 \cdot 10^{-8}. \qquad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.208 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.541) = 0.151 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.014 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.454) = 0.252 \cdot 10^{-7}. \qquad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.826 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.368) = 0.416 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.643 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.28) = 0.64 \cdot 10^{-7}. \qquad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.46 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.99 \cdot 10^{-7}.$$

Таблиця 4

**Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 500 Мбіт/с при *T*=293 К**

| Ймовірність бітової помилки, $10^{-8}$ | 0.0987 | 0.182 | 0.312 | 0.533 | 0.901 | 1.512 | 2.518 | 4.161 | 6.459 | 9.964 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Потужність сигналу на вході приймача, дБВт | -94.39 | -94.52 | -94.66 | -94.80 | -94.94 | -95.08 | -95.21 | -95.35 | -95.49 | -95.63 |
| Співвідношення сигнал/шум, $E_b/N_0$ | 18 | 17.43 | 16.89 | 16.36 | 15.85 | 15.35 | 14.47 | 14.40 | 13.95 | 13.52 |

Проведемо аналогічні розрахунки для швидкості передачі *R*=500 Мбіт/с за температури *T*=283 К та *T*=308 К, результати яких надані у таблицях 5 та 6.

Таблиця 5

**Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 500 Мбіт/с при *T*=283 К**

| Ймовірність бітової помилки, $10^{-8}$ | 0.0987 | 0.182 | 0.312 | 0.533 | 0.901 | 1.512 | 2.518 | 4.161 | 6.459 | 9.964 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Потужність сигналу на вході приймача, дБВт | -94,54 | -94,679 | -94,81 | -94,95 | -95,09 | -95,23 | -95,37 | -95,50 | -95,64 | -95,78 |
| Співвідношення сигнал/шум, $E_b/N_0$ | 18 | 17.437 | 16.891 | 16.362 | 15.85 | 15.354 | 14.473 | 14.408 | 13.957 | 13.52 |

Таблиця 6

**Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 500 Мбіт/с при *T*=308 К**

| Ймовірність бітової помилки, $10^{-8}$ | 0.0987 | 0.182 | 0.312 | 0.533 | 0.901 | 1.512 | 2.518 | 4.161 | 6.459 | 9.964 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Потужність сигналу на вході приймача, дБВт | -94,17 | -94,31 | -94,44 | -94,58 | -94,72 | -94,84 | -95,02 | -95,14 | -95,27 | -95,41 |
| Співвідношення сигнал/шум, $E_b/N_0$ | 18 | 17.43 | 16.89 | 16.36 | 15.85 | 15.35 | 14.47 | 14.40 | 13.95 | 13.52 |

У відповідності до даних табл. 4, 5, 6 побудовано графік залежності значень ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача за заданих температур (рис. 4).

**Висновки**

1. Мінімальне співвідношення сигнал/шум на вході приймача при модуляції ФМ-2 не повинно бути нижче 6 – 7 дБ. При оптимальному прийманні сигналів з фазовою модуляцією ФМ-2 у каналі без кодування

на вході демодулятора при швидкості коду $R_{код}=1$ за мінімального співвідношення сигнал/шум 6 дБ імовірність бітової помилки буде складати $2.4\cdot10^{-3}$, а при співвідношенні сигнал/шум 12 дБ імовірність бітової помилки буде складати $9\cdot10^{-9}$, що забезпечує високу якість зв'язку.

2. Для забезпечення імовірності бітових помилок в межах від $0.98\cdot10^{-7}$ до $0.99\cdot10^{-9}$: при швидкості передачі цифрової інформації R1=5 Мбіт/с потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -114,39 дБ до -115,63 дБ; при R2=100 Мбіт/с потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -101,38 дБ до -102,62 дБ; при R3=500 Мбіт/с потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,39 дБ до -95,63 дБ.

Таким чином, при збільшені швидкості передачі цифрової інформації в телекомунікаційних мережах від 5 Мбіт/с до 500 Мбіт/с (у 100 разів) необхідно підвищити потужність сигналу на вході приймача у 100 разів (20 дБ), що забезпечує задану якість зв'язку.

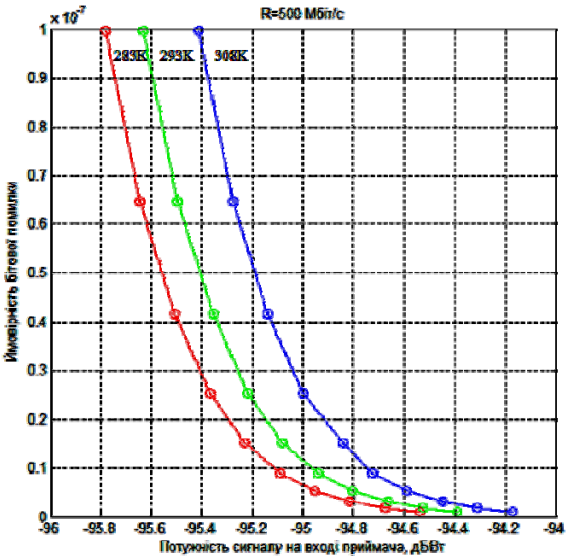



**Рис. 4. Залежність значень ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача за заданих температур**

3. Для забезпечення імовірності бітових помилок в межах від $0.98\cdot10^{-7}$ до $0.99\cdot10^{-9}$: при швидкості передачі цифрової інформації R3=500 Мбіт/с: за температури навколишнього середовища T=283 K потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,54 дБ до -95,78 дБ; за температури навколишнього середовища T=293 K потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,39 дБ до -95,63 дБ; за температури навколишнього середовища T=308 K потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,17 дБ до -95,42 дБ.

За швидкості передачі цифрової інформації R3=500 Мбіт/с при підвищенні температури навколишнього середовища з 283 K до 308 K (на 25 K) потужність сигналу на вході приймача необхідно підвищити в середньому на 0,37 дБ (у 1,09 разів).

## Література

1. Банкет В. Л. Завадостійке кодування в телекомунікаційних системах на-вч. посіб. з вивчення модуля 4 дисципліни ТЕЗ / В.Л. Банкет, П.В. Іващенко, М.О. Іщенко. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. – 100 с.

2. Стеклов В.К. Теорія електричного зв'язку / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман ; за ред. В.К. Стеклова. – К. : Техніка, 2006. – 552 с.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. ; пер. с англ. – [2-е изд., испр.]. – М. : Изд. дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.

4. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.

### References

1. Banket V. L. Zavadostiike koduvannia v telekomunikatsiinykh systemakh na-vch. posib. z vyvchennia modulia 4 dystsypliny TEZ / V.L. Banket, P.V. Ivashchenko, M.O. Ishchenko. – Odesa : ONAZ im. O.S. Popova, 2011. – 100 s.

2. Steklov V.K. Teoriia elektrychnoho zviazku / V.K. Steklov, L.N. Berkman ; za red. V.K. Steklova. – K. : Tekhnika, 2006. – 552 s.

3. Sklyar B. Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie / Sklyar B. ; per. s angl. – [2-e izd., ispr.]. – M. : Izd. dom "Vilyams", 2003. – 1104 s.

4. Sukachev E.A. Sotovye seti radiosvyazi s podvizhnymi obektami : ucheb. posob. / Sukachev E.A. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 c.

Рецензія/Peer review : 16.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-121-125
УДК 004.052

Н.М. ВАСИЛЬКІВ, Л.О. ДУБЧАК, І.В. ТУРЧЕНКО
Тернопільський національний економічний університет

# НЕЧІТКА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ

*Розроблено нечітку систему оцінювання якості функціонування інформаційної управляючої системи, входами якої є стан надійності технічного, програмного та інформаційного забезпечення, а виходом – рівень якості. Запропонований підхід можна з успіхом використовувати під час оцінювання якості функціонування інформаційної управляючої системи, не володіючи достатньо точною і чіткою інформацією про стан її забезпечувальної частини.*

*Ключові слова: інформаційна управляюча система, якість, надійність, відмова, нечітка логіка.*

N.M. VASYLKIV, L.O. DUBCHAK, I.V. TURCHENKO
Ternopil National Economic University

## FUZZY SYSTEM OF QUALITY EVALUATION OF THE INFORMATION CONTROL SYSTEM FUNCTIONING

*The purpose of the research is evaluation of the influence of the information control system providing part on the quality of its functioning. In the process of the information control system functioning, the moment of failure of the hardware, software component or of information distortion is uncertain, therefore it is expedient to assess the system quality based on fuzzy logic method. The fuzzy system of estimating the influence of the providing part of the information control system on the quality of its functioning was developed, the inputs of which is the reliability state of the technical, software and information support, and the output is the level of the system's functioning quality. Fuzzy Logic Toolbox for MATLAB is used for fuzzy system building. The dependence model of output values on to the inputs is given by a Mamdani fuzzy knowledge base. The membership functions of the input variables should be given by a bell-shaped form. The membership functions of the developed fuzzy system output are given by the triangle form. The rules base of the proposed fuzzy system consists of 63 rules of type "if -then". The proposed fuzzy system makes it possible to simulate the situation regarding the effect of the providing part on the system's operation quality at any time of its operation, with the sudden change in the reliability of some kind of information control system support, as well as in considering and analyzing the prospects for the system improving. The proposed approach can be successfully used in assessing the impact of the reliability of the information control system providing part on the quality of its functioning, without having sufficiently accurate and exact information.*

*Keywords: information management system, quality, reliability, rejection, fuzzy logic.*

### Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційних управляючих систем (ІУС) характеризується підвищеними вимогами до якості функціонування. Проте, не дивлячись на інтенсивний розвиток і впровадження сучасних технологій і методів, що застосовуються в ході створення інформаційних управляючих систем, в даній області залишаються ще не вирішені задачі. Підвищену увагу до проблем якості ІУС спричиняє важливість функцій, які виконуються системою і, як наслідок цього, зростають вимоги до надійності та якості їх виконання в реальних умовах експлуатації.

Вирішення проблеми забезпечення та підвищення якості інформаційних управляючих систем має багато напрямів. Одним із них є моніторинг факторів впливу на надійність ІУС, результати якого дають змогу виявити та врахувати недоліки проектування складових частин системи.

Іншим підходом може бути врахування зміни надійності найбільш впливаючих факторів в процесі експлуатації та, як наслідок, зміни рівня якості функціонування системи з метою оперативного втручання в роботу системи та прийняття рішень щодо втримання системи на заданому рівні якості функціонування. До переліку впливаючих факторів можливого погіршення функціонування системи, спричиненого її забезпечувальною частиною, рекомендується вносити технічну, програмну та інформаційну складові [1, 2].

Метою дослідження є оцінювання впливу забезпечувальної частини ІУС на якість її функціонування.

В процесі функціонування ІУС момент відмови технічної, програмної складової чи спотворення інформації є невизначеним, тому доцільним є оцінювання рівня якості системи на основі методу, що базується на нечіткій логіці [1, 2].

### Виклад основного матеріалу

Для інформаційної управляючої системи, в умовах невизначеності рівня надійності її видів забезпечення, характерними є зміни якості її функціонування [1, 2]. Тому в ситуації ризику зниження якості функціонування ІУС в умовах невизначеності рівня надійності її окремих компонентів найбільш доцільним є застосування апарату нечіткої логіки, яка дає змогу управляти зовнішніми впливами на основі деяких ймовірних значень, приблизних критеріїв, нечітких прогнозів та їх взаємозалежностей [3, 4].

Загальна структура управління системою, що використовує нечітку логіку, показана на рис. 1 [3, 4].

Блок фазифікації перетворює чіткі величини, виміряні на виході об'єкта керування (в даному випадку ІУС), на нечіткі величини, описані лінгвістичними змінними у базі знань. Блок рішень використовує нечіткі умовні (if – then) правила, закладені у базі знань, для перетворення нечітких вхідних даних на необхідні керуючі впливи, що мають також нечіткий характер. Блок дефазифікації перетворює нечіткі дані з виходу блоку рішень на чітку величину, яка використовується для контролю надійності

забезпечувальної частини та, відповідно, якості ІУС [3, 4].

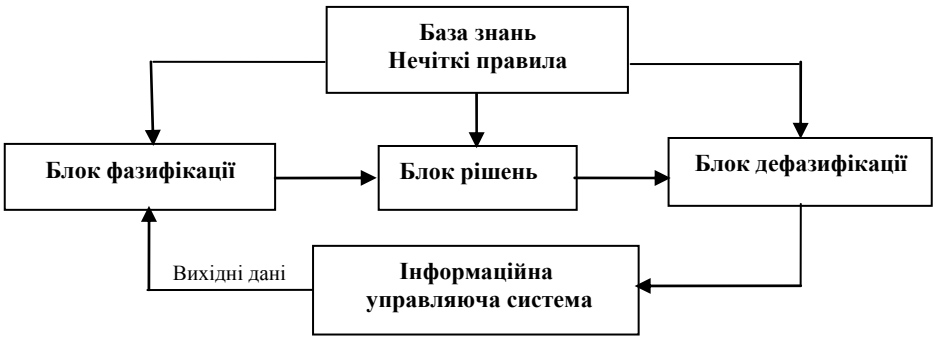



**Рис. 1. Загальна структура нечіткого управління системою**

Для побудови та перевірки правильності роботи нечіткої системи оцінювання впливу надійності забезпечувальної частини ІУС на якість її функціонування використовується засіб Fuzzy Logic Toolbox середовища MATLAB. Передбачається, що модель залежності вихідних значень від вхідних задана нечіткою базою знань Мамдані [3, 5–9]. Нечіткі системи, що базуються на механізмі Мамдані, широко використовуються для досліджень в різних сферах [2, 6, 10, 11].

Загальна схема пропонованої нечіткої системи подана на рис. 2.

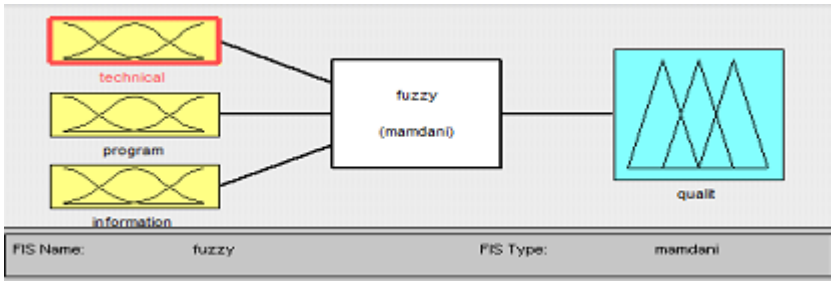



**Рис. 2. Нечітка система, розроблена в середовищі MATLAB**

Нечітка система розподілу якості функціонування ІУС на вхід отримує значення надійності технічного забезпечення (*technical),* програмного забезпечення (*program),* інформаційного забезпечення (*information)*. Виходом нечіткої системи є якість функціонування системи (*quality)*.

При розробці математичних моделей на базі нечіткої логіки одним із основних та важливих етапів моделювання є вибір методу побудови функцій належності, за допомогою яких формалізуються нечіткі терми.

Слід зазначити, що функції належності вхідних змінних доцільно задавати дзвоноподібною формою, що буде максимально точно їх описувати. Для задання функцій належності кожної змінної необхідно спочатку визначити їх інтервал значень.

Стан технічного забезпечення можна задати, наприклад, в діапазоні [0, 1], розділивши його на підмножини:

- безвідмовність (*trouble-free*) – [1; 0,5];
- відмова (*crash*) – [0,5; 1];
- збій (*refusal*) – [0,1; 0,9].

Задання функцій належності вхідної змінної *technical* засобами Membershop Function Editor середовища MATLAB подано на рис. 3.

Аналогічно дзвоноподібним заданням будуються функції належностей інших вхідних змінних: *program* та *information*.

Вхідна змінна нечіткої системи *program* буде задаватися наступними нечіткими множинами:

- працездатне (*workable*) - [1; 0,5];
- дефект (*defect*) - [0,1; 0,9];
- відмова (*refusal*) - [0,5; 1].

Вхідну змінну *information* можна задати наступними нечіткими множинами:

достовірна (reliable) - [1; 0,4];

неповна (incomplete) - [0,1; 0,9];

спотворена (distorted) - [0,6; 1].

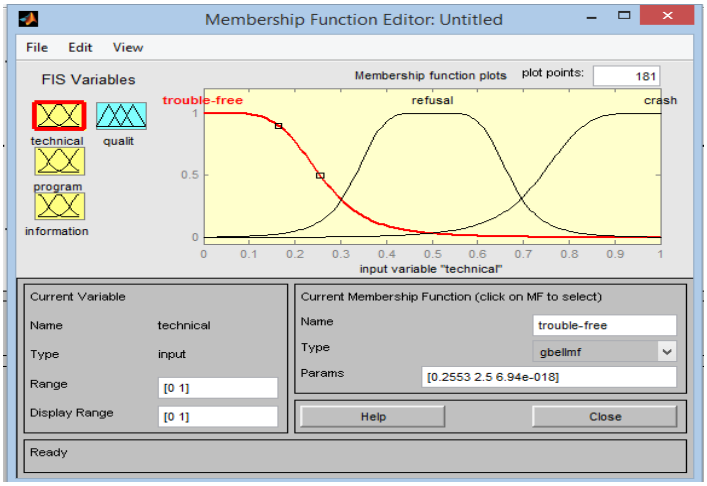



**Рис. 3. Функції належності вхідної змінної *technical***

Функції належності виходу розробленої нечіткої системи задаються трикутною формою (рис. 4), що дасть можливість точнішого проведення дефазифікації.

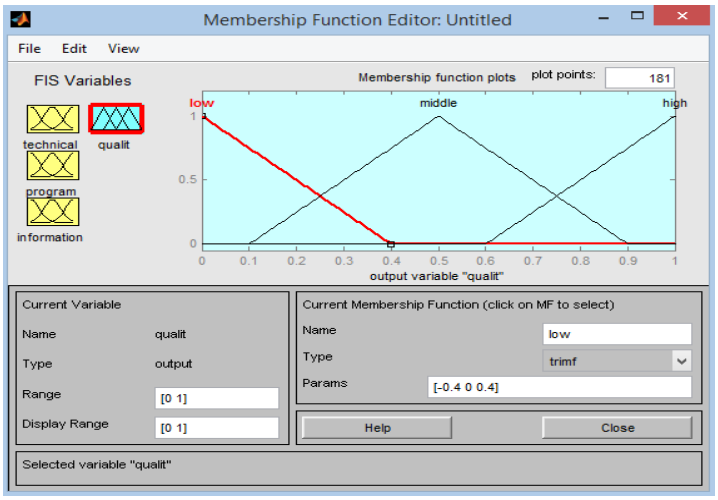



**Рис. 4. Функції належності виходу *quality***

В даному випадку вихід нечіткої системи інтерпретує якість функціонування інформаційної управляючої системи. Нечітка множина *middle*, що задається на інтервалі [0,1; 0,9], вказує на середнє значення якості, викликане зниженням рівня надійності технічного чи програмного забезпечення або неповнотою вхідної інформації. Якщо якість функціонування системи висока, то вихідна змінна нечіткої системи *quality* задається множиною *high*, що відображає інтервал значень [0,6; 1]. Якщо ж якість низька, то вихід розробленої нечіткої системи задається множиною *low* [1; 0,4] (див. рис. 4).

Робота нечіткої системи залежить від бази правил. Оскільки кожна вхідна змінна задана чотирма функціями належності і враховуючи ситуацію, коли надійність технічного чи програмного забезпечення не задана комп'ютерною системою, то база правил складається з $R = 4 \cdot 4 \cdot 4 - 1 = 63$ правил типу «якщо - то». Випадок, коли не задані всі вхідні змінні, не може розглядатися, оскільки тоді нечітка система не може видати висновок щодо виходу. База правил будується відповідно до даних таблиці 1 (у таблиці 1 подано лише деякі із 63 можливих варіантів).

Таблиця 1

**Відповідність вхідних та вихідної змінних розробленої нечіткої системи**

| Технічне забезпечення | Програмне забезпечення | Інформаційне забезпечення | Якість ІУС |
|---|---|---|---|
| безвідмовне | працездатне | достовірна | висока |
| … | … | … | … |
| безвідмовне | дефект | спотворена | низька |
| відмова | працездатне | достовірна | низька |
| … | … | … | … |
| збій | працездатне | неповна | середня |
| None | працездатне | достовірна | висока |
| безвідмовне | None | спотворена | низька |

Наприклад, якщо технічне забезпечення приймає значення, що належить множині *безвідмовне*, програмне забезпечення є *працездатним*, а інформація поступила на вхід системи *спотворена*, то можна передбачити, що якість функціонування ІУС буде *низька*. Правило, що описує даний випадок, буде мати вигляд: *If (technical is trouble-free) and (program is workable) and (information is distorted) then (quality is low).*

Вікно формування бази правил засобу Rule Editor середовища MATLAB зображено на рис. 5.

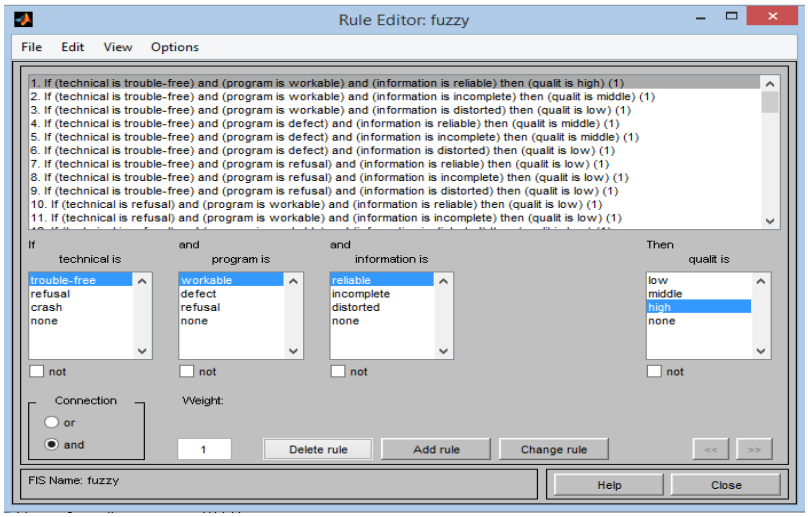



**Рис. 5. Вікно формування бази правил**

Для перевірки правильності роботи нечіткої системи оцінювання впливу забезпечувальної частини ІУС на якість її функціонування використовується програма перегляду правил системи нечіткого висновку (рис. 6).

**Рис. 6. Вікно програми перегляду правил системи нечіткого висновку**

За допомогою коду розробленої нечіткої системи оцінювання якості функціонування інформаційної управляючої системи можна змінювати значення функцій належності, а також самі входи і вихід пропонованої нечіткої системи, що дає змогу в режимі реального часу враховувати зміну впливаючих факторів.

## Висновки

Побудована нечітка система дає змогу моделювати ситуацію щодо впливу забезпечувальної частини на якість функціонування системи в будь-який момент її експлуатації, при раптовій зміні надійності якогось виду забезпечення ІУС, а також при розгляді та аналізі перспективи вдосконалення системи. Запропонований метод дасть змогу управлінському персоналу, не володіючи достатньо точною і чіткою інформацією, оцінити вплив надійності забезпечувальної частини ІУС на якість її функціонування за допомогою нечіткого оцінювання.

## Література

1. Васильків Н. М. Фактори впливу на надійність функціонування інформаційних управляючих систем / Н. М. Васильків Н.М., І. В. Турченко, Н. Й. Веретик // Сучасні комп'ютерні інформаційні

технології (ACIT'2016) : VI Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів, 20-21 травня 2016 р. : матеріали. – Тернопіль, 2016. – С. 98-99.

2. Васильків Н. М. Метод нечіткого оцінювання впливу персоналу на якість функціонування інформаційної системи / Н. М. Васильків, В. П. Казімірчук // Осінні наукові читання : VII міжнародна конференція, 31 жовтня, 2018 р. : збірник статей. – К. : Центр наукових публікацій, 2018. – С. 101–104.

3. Штовба С. Д. Обеспечение точности и прозрачности нечеткой модели Мамдани при обучении по экспериментальным данным / С. Д. Штовба // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 4. – С. 102–114.

4. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. – М. : Телеком, 2006. – 382 с.

5. Dubchak L. Fuzzy Data Processing Method / L. Dubchak, N. Vasylkiv, V. Kochan, A. Lyapandra // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2013): 7th IEEE International Conf., 12–14 September 2013: Proceedings. – Berlin, Germany, 2013. – P. 373–375.

6. Дубчак Л. О. Засіб розподілу доступу до інформаційних ресурсів комп'ютерної системи / Л. О. Дубчак // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 3 (225). – С. 160–164.

7. Dubchak L. Improved Algorithm for Fuzzy Data Processing / L. Dubchak, N. Vasylkiv, V. Kochan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014): International Conf., February 25 - March 1, 2014: Proceedings. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 668.

8. Дубчак Л. О. Метод обробки нечітких даних на основі механізму Мамдані / Л. О. Дубчак // Системи обробки інформації. – 2012. – № 7(105). – С. 131–134.

9. Дубчак Л. О. Средство ускоренной обработки нечетких данных на основе механизма Мамдани / Л. О. Дубчак, В. В. Кочан, Н. М. Василькив // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, математика, информатика. – 2016. – № 5(101). – С. 23–26.

10. Васильків Н. М. Нечітка система розподілу завдань для тестування студентів / Н. М. Васильків, Л. О. Дубчак, Т. В. Лендюк, І. В. Турченко // Вісник Чернівецького національного університету ім. Федьковича. Комп'ютерні системи та компоненти. – 2016. – Т. 7. – С. 20–24.

11. Vasylkiv N. Tasks Distribution for Students Testing Based on Fuzzy Logic / N. Vasylkiv, L. Dubchak, T. Lendyuk, I. Turchenko, I. Shylinska, M. Aleksander // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017): 9th IEEE International Conf., 21–23 September 2017: Proceedings. – Bucharest, Romania, 2017. – Vol. 1. – P. 26–29.

**References**

1. Vasylkiv N. M. Faktory vplyvu na nadiinist funktsionuvannia informatsiinykh upravliaiuchykh system / N. M. Vasylkiv N.M., I. V. Turchenko, N. Y. Veretyk // Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnolohii (ASIT2016) : VI Vseukrainska shkola-seminar molodykh vchenykh i studentiv, 20-21 travnia 2016 r. : materialy. – Ternopil, 2016. – S. 98-99.

2. Vasylkiv N. M. Metod nechitkoho otsiniuvannia vplyvu personalu na yakist funktsionuvannia informatsiinoi systemy / N. M. Vasylkiv, V. P. Kazimirchuk // Osinni naukovi chytannia : VII mizhnarodna konferentsiia, 31 zhovtnia, 2018 r. : zbirnyk statei. – K. : Tsentr naukovykh publikatsii, 2018. – S. 101–104.

3. Shtovba S. D. Obespechenie tochnosti i prozrachnosti nechetkoj modeli Mamdani pri obuchenii po eksperimentalnym dannym / S. D. Shtovba // Problemy upravleniya i informatiki. – 2007. – № 4. – S. 102–114.

4. Rutkovskaya D. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy / Rutkovskaya D., Pilinskij M., Rutkovskij L. – M. : Telekom, 2006. – 382 s.

5. Dubchak L. Fuzzy Data Processing Method / L. Dubchak, N. Vasylkiv, V. Kochan, A. Lyapandra // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS2013): 7th IEEE International Conf., 12–14 September 2013: Proceedings. – Berlin, Germany, 2013. – R. 373–375.

6. Dubchak L. O. Zasib rozpodilu dostupu do informatsiinykh resursiv kompiuternoi systemy / L. O. Dubchak // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2015. – № 3 (225). – S. 160–164.

7. Dubchak L. Improved Algorithm for Fuzzy Data Processing / L. Dubchak, N. Vasylkiv, V. Kochan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET2014): International Conf., February 25 - March 1, 2014: Proceedings. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 668.

8. Dubchak L. O. Metod obrobky nechitkykh danykh na osnovi mekhanizmu Mamdani / L. O. Dubchak // Systemy obrobky informatsii. – 2012. – № 7(105). – S. 131–134.

9. Dubchak L. O. Sredstvo uskorennoi obrabotky nechetkykh dannыkh na osnove mekhanyzma Mamdany / L. O. Dubchak, V. V. Kochan, N. M. Vasylkyv // Vestnyk Brestskoho hosudarstvennoho tekhnycheskoho unyversyteta. Fyzyka, matematyka, ynformatyka. – 2016. – № 5(101). – S. 23–26.

10. Vasylkiv N. M. Nechitka systema rozpodilu zavdan dlia testuvannia studentiv / N. M. Vasylkiv, L. O. Dubchak, T. V. Lendiuk, I. V. Turchenko // Visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu im. Fedkovycha. Kompiuterni systemy ta komponenty. – 2016. – T. 7. – S. 20–24.

11. Vasylkiv N. Tasks Distribution for Students Testing Based on Fuzzy Logic / N. Vasylkiv, L. Dubchak, T. Lendyuk, I. Turchenko, I. Shylinska, M. Aleksander // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS2017): 9th IEEE International Conf., 21–23 September 2017: Rroceedings. – Bucharest, Romania, 2017. – Vol. 1. – R. 26–29.

Рецензія/Peer review : 13.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Саченко А.О.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-126-133
УДК 681.3: 621.3.08

Д.В. ЧЕРНЕТЧЕНКО, М.М. МІЛИХ, К.В. ЛУДАНОВ
Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

# АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОЇ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНОГО СИГНАЛУ (ЕКГ)

*Портативні пристрої для моніторингу параметрів життєдіяльності людини в реальному часі, такі як переносні електрокардіографи (ЕКГ), стали дуже популярними на сьогодні. У даній роботі запропоновано інтелектуальний та енергоефективний підхід для задачі детектування QRS комплексу з сирих електрокардіографічних (ЕКГ) даних, реалізований за допомогою апаратного рішення. QRS комплекс є однією з найбільш важливих ознак електрокардіограми (ЕКГ), яка забезпечує дуже важливу інформацію про поточний стан серця та серцево-судинної системи в цілому. Новизна нашого підходу полягає в (1) попередній фільтрації сирого сигналу за допомогою алгоритму цифрової фільтрації; (2) кодуванні просторово-часових властивостей ЕКГ-сигналу безпосередньо в спайкову послідовність та її використання для збудження мультистабільної спайкової нейронної мережі (SNN) та (3) у відсутності необхідності будь-якого супервізора для детектування заздалегідь заданих ознак у сигналі. Реалізовано штучну нейронну структуру на мультистабільних нейронах з біологічною подібністю поведінки. Рішення для штучної нейрональної мережі (ANN) впроваджено та перевірено за допомогою архітектури програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) DIGILENT BASYS II SPARTAN-3E XC3S100E з використанням середовища WebPACKTM ISE 13.3. Результати показали високу точність виявлення R-піків ЕКГ та обчислення RR інтервалі нарізних базах даних: MIT-BIH ECG та внутрішній ЕКГ базі даних лабораторії (intdb), що сигналізує про значний потенціал цього підходу для інтеграції в прототипи майбутніх портативних пристроїв.*

*Ключові слова: електрокардіограма, ЕКГ, штучні нейронні мережі, мультистабільні нейронні мережі, QRS детектор, спайкові нейроні мережі, FPGA, Spartan-3E, VHDL, нейроморфні рішення.*

D.V. CHERNETCHENKO, M.M. MILYKH, K.V. LUDANOV
Dnipropetrovsk National University named after Oles Gonchar

## MACHINE IMPLEMENTATION OF THE IMPULSE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR DETECTION OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL PARAMETERS (ECG)

*Portable devices for monitoring human lifetime parameters in real time, such as wearing electrocardiographs (ECGs), have become very popular today. In this work, an intellectual and energy-efficient approach for the detection of QRS complex from raw electrocardiographic (ECG) data, implemented with the help of hardware decision. The QRS complex is one of the most important electrocardiograms (ECGs), which provides very important information about the current state of the heart and the cardiovascular system as a whole. However, the problems associated with the accuracy of QRS real-time detection of complexes and the classification of various features of the ECG signal structure and the energy efficiency of such hardware solutions remain open questions. The novelty of our approach is (1) preliminary filtration of the raw signal using the digital filtering algorithm; (2) encoding the spatial-temporal properties of the ECG signal directly into the adhesive sequence and its use to excit the multi-stable adhesion neural network (SNN); and (3) in the absence of any supervisor to detect predetermined signals in the signal. An artificial neural structure is implemented on multi-stable neurons with a biological similarity of behavior. An artificial neural network (ANN) solution was implemented and verified using the DIGILENT BASYS II SPARTAN-3E XC3S100E programmable logic integrated circuits (FPGAs) architecture using the WebPACKTM ISE 13.3 environment. The transmission of incoming and outgoing digital data between a FPGA device and a PC is implemented using a universal asynchronous transfer interface (UART). The results showed a high accuracy of the detection of R-peaks of ECG and RR calculation of the interval of rifled databases: the MIT-BIH ECG and the internal ECG of the laboratory database (intdb), which signals the significant potential of this approach for integration into prototypes of future portable devices.*

*Keywords: electrocardiogram, ECG, artificial neural networks, multi-stable neural networks, QRS detector, spin neural network, FPGA, Spartan-3E, VHDL, neuromorphic solutions.*

## Вступ

Виявлення комплексу QRS в електрокардіографічному (ЕКГ) сигналі забезпечує фундаментальну можливість для виявлення інших компонентів сигналу і подальшого автоматичного аналізу [1, 2, 3]. Однак характеристики ЕКГ підвищують складність автоматичного виявлення форми ЕКГ [4]. По-перше, це особливість морфології сигналів ЕКГ, що змінюється від людини до людини. По-друге, сигнал ЕКГ досить часто має компоненти шуму різного походження. У роботі [5] запропоновано адаптивний алгоритм фільтрації, заснований на штучній нейронній мережі (ANN) для виявлення QRS. Але результативність роботи такої системи все ще дуже сильно залежить від якості вибірки даних для тренування системи. Ідентифікація QRS з ЕКГ є фундаментальною необхідністю для оцінки частоти серцевих скорочень і аналізу варіабельності серцевих ритму (ВСР). Хоча методики виявлення QRS досягли дуже успішних результатів з часом [5], останні досягнення в області медичної допомоги [5, 6] мотивували дослідників повернутися до питання точності детектування QRS. Це пов'язано (1) з показаннями ЕКГ з носимих датчиків, сигнал з яких потопає у артефактах руху та дрейфах базової лінії; (2) пристрої, що вбудовують переносні ЕКГ-датчики, дуже обмежені за площею, енергоспоживанням і обчислювальними можливостями. Більш ранні методи аналізу ЕКГ-сигналів засновані на методі аналізу часових характеристик сигналу за допомогою мікроконтролерів на основі DSP, але часове представлення не завжди достатнє для вивчення всіх особливостей сигналів ЕКГ. Отже, потрібно частотне представлення сигналу. Для досягнення цього

використовується швидке перетворення Фур'є, або FFT (Fast Fourier Transform). Зазвичай, це призводило до неминучих обмежень цих методів, оскільки перетворення необхідно виконувати неперервно у часі, із досить великою швидкість та точністю, ця задача зазвичай потребує значних ресурсів та може суттєво підвищити енергоспоживання системи [7].

У цій роботі було використано спайкові нейронні мережі (SNN) [8, 9, 10], яку реалізовано на ПЛІС-архітектурі для оцінки RR інтервалів з ЕКГ у реальному часі. SNN – це дуже потужні і біологічно реалістичні моделі обчислень, що за динамікою дуже схожі на динаміку людського мозку. Спайкові нейронні мережі набувають популярності у вирішенні задач комплексного розпізнавання образів [11,12], апроксимації функцій [13] та класифікації зображень [14, 15]. Але сучасні вбудовані мікроконтролерні системи все ще мають дуже низьку обчислювальну продуктивність [15]. На відміну від цього, ПЛІС мають властивість ре-конфігурації під час роботи і мають дуже низьке енергоспоживання з одночасно високою продуктивністю. Головна мета роботи полягає в тому, щоб створити надійну та стабільну модель штучної нейронної мережі (ANN) на ПЛІС-архітектурі.

Аналоговий сигнал ЕКГ кодується безпосередньо в імпульси, або спайки, які використовуються для збудження резервуара рекурентно пов'язаних спайкових нейронів[16]. Нейрони в архітектурі з'єднані між собою за допомогою синапсів, з оновленням ваги з використанням спайкової час-залежної пластичності (STDP) [16, 17], важливою варіацією правила Хебба. На етапі зчитування результатів у архітектурі використовується бі-стабільний нейрон, який інтегрує сигнали з внутрішніх спайкових нейронів, і генерує вихідні розряди, коли система виявляє комплекс QRS. Для вилучення додаткових ознак сигналу ЕКГ доцільно використовувати масиви вихідних нейронів для ініціювання відповідного виходу при наявності певного стану внутрішніх нейронів, що може відповідати певній особливості вхідного сигналу (наприклад, P, Q, S, Tпіки). Робота системи валідується за допомогою бази даних ЕКГ:(1) база даних MIT-BIH та (2) внутрішня база даних ЕКГ записів. Для оцінки параметрів точності детектування системи застосовано опорний детермінований алгоритм виділення R-піків з ЕКГ сигналу.

## Методика

*Архітектура системи.* Шуми різного походження завжди змішуються з корисним ЕКГ-сигналом і призводять до появи таких перешкод, як дрейфи ізолінії, артефакти і інтерференційні коливання [1, 2, 3]. Попередні експерименти показують, що попередня обробка та фільтрація сигналу дуже важлива та необхідна для нормального та стабільного процесу навчання та наступного розпізнавання за допомогою SNN на реальних сигналах. Таким чином, вхідний ЕКГ-сигнал проходить етап фільтрації та попередньої обробки, який складається з а) фільтру низьких частот з частотою зрізу 15 Гц; б) фільтру верхніх частот з частотою зрізу 5 Гц; в) диференційного фільтру; г) обчислення квадратури сигналу та д) фільтрації вікном усереднення (з вікном 0.150 с). Загальна схема та напрямок розповсюдження даних у запропонованій системі представлено на рис. 1.

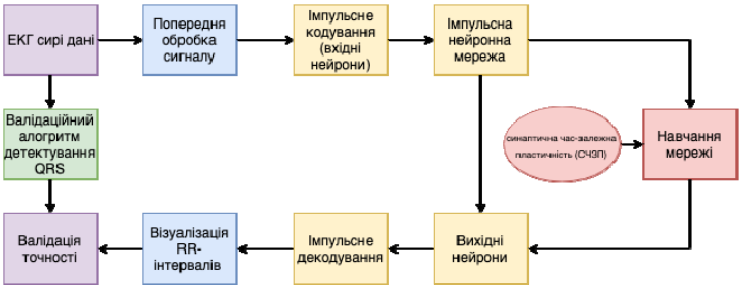
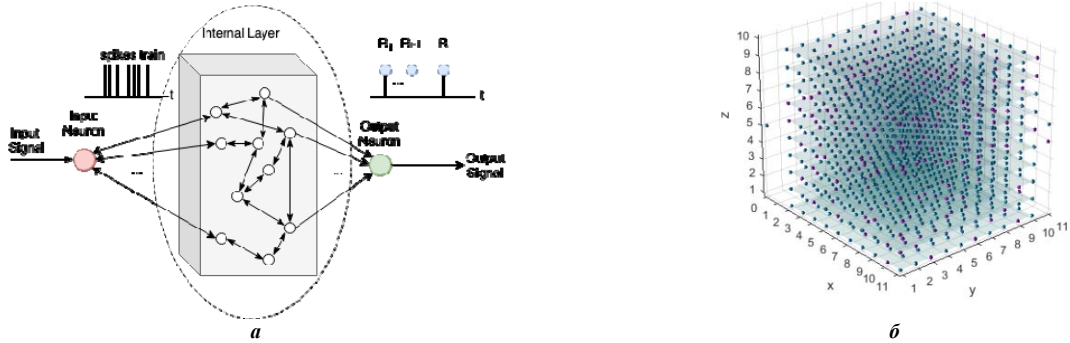



**Рис. 1. Загальна архітектура системи: вхідні дані ЕКГ надходять одночасно до SNN і опорного алгоритму детектування QRS комплексу для оцінки результатів за точністю в режимі реального часу**

Нейронна структура складається з трьох шарів: вхідний, рекурентний і вихідний. Перший шар є вхідним шаром, який генерує послідовність спайків (закодований вхідний ЕКГ сигнал). Структура мережі нейтронів, представлена окремо схематично рисунку 2*а*. Загальна нейронна структура у 3D перспективі, наведена на рис. 2*б*.

Часове кодування [18] дозволяє кодувати інформацію, як інтервали часу між нормованими за амплітудою імпульсами, повністю при цьому представляючи просторово-темпоральну структуру вхідного сигналу. Спайковий шифратор кодує вхідний сигнал ЕКГ у вигляді послідовності імпульсів, інтервал між якими змінюється пропорційно до швидкості зростання самого сигналу, якщо сигнал не змінний, або спадає, то вихідні спайки не генерується. Цей елемент реалізовано, використовуючи комбінацію порогових модуляторів, компаратора напруги, генератора спайків і таймера. Структура детально показана на рисунку 3.

Щоб запобігти ефекту накладання сигналу, додано адаптацію тактової частоти таймера у відповідь на швидкість зростання вхідного сигналу. Це дозволяє SNN краще розрізнити дві послідовності спайків, та відповідно підвищує точність. Найбільш оптимальним підходом до адаптації частоти таймера є встановлення його тактової частоти, пропорційною найбільш значній компоненті Фур'є представлення для вхідного сигналу. Приклад роботи спайкового шифратора для ЕКГ-семплуз бази даних, показаного на рисунку 4.




*а* *б*

**Рис. 2. а – загальний вигляд спайкової мережі нейронів: вхідний шар, внутрішній шар з рекурентно пов'язаними нейронами та вихідний шар мережі; б – вигляд SNN у 3D перспективі**

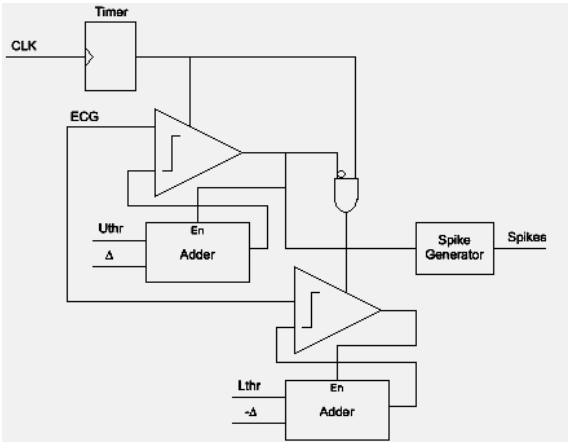



**Рис. 3. Внутрішня структура шифратора сигналу ЕКГ для отримання послідовності спайків на виході. На діаграмі показано наступні компоненти: порогові компоненти, компаратори напруги, генератор спайків і таймер, вхідний сигнал надходить на вхід компараторів, зазначений міткою ECG. $U_{thr}$ – верхній поріг порогового модулятора, $L_{thr}$ – нижній поріг порогового модулятора, Δ - приріст значення порогу**

Другий шар мережі є рекурентним шаром [19] і складається з $N = N_E + N_I$ рекурентно пов'язаних нейронів, де $N_E$ є числом збуджуючих нейронів, а $N_I$ – число тормозних нейронів. Внутрішній мережевий шар складається з мультистабільних нейронів, при цьому мультистабільність нейронів обумовлена метричною асиметрією активної їх дендритної структури, як показано у [20].

Вихідна активна функціональність [19] кожного нейрона описується диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} v' = 0,04v^2 + 5v + 140 - u + I_0 \\ u' = a\left(bv - u\right) \end{cases} \quad (1)$$

Скидання системи до початкового стану після генерації спайку:

$$if v \geq 30mV,\ then \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases} \quad (2)$$

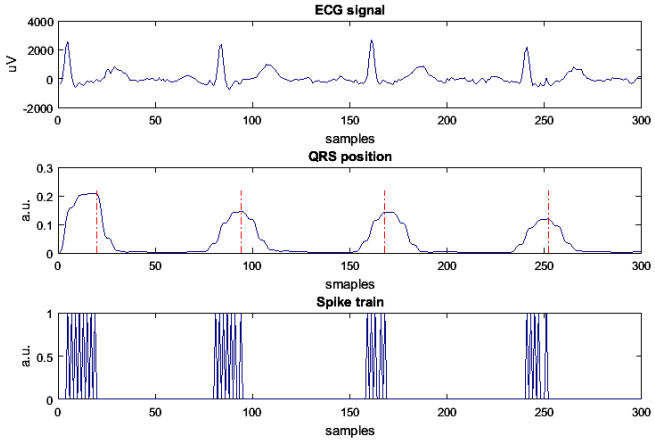


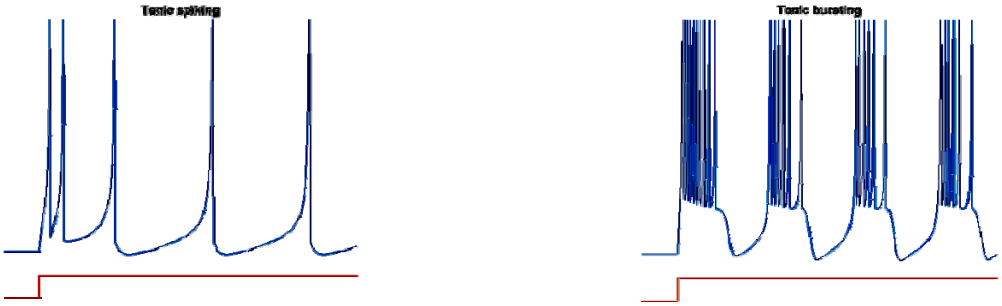

**Рис. 4. Збільшений фрагмент сигналу ЕКГ і відповідні генеровані спайкові послідовності**

Кожен нейрон має три стабільних стани соматично-дендритної структури за рахунок їх дендритної метричної асиметрії [20]. Стабільні стани внутрішніх нейронів визначаються внутрішнім розподілом струму $I_0$ структурою нейрона. Типовий процес тонічної генерації спайків і тонічний розрив, описаний системами рівнянь (1) і (2), що генеруються мережевими нейронами, показаними на рисунках 6*а* і *б*. Рисунок 6*а* відповідає набору параметрів: $a$=0.02, $b$=0.2, $c$=-65, $d$=6 і двом стаціонарних стабільним станам нейрону. Модель з набором параметрів: $a$=0.03, $b$=0.25, $c$=-52, $d$=0, відповідає випадку три-стабільності нейрональної структури, та її вихідні коливання показані на рисунку 6*б*.

Нейрональний каркас складається з $N$=1000 внутрішніх нейронів з часткою $N_I$ = 0,25 $N_E$. З'єднання між двома окремими нейрональними вузлами встановлюються з імовірністю, розрахованою за правилом:

$$P(D) = C * \exp\left(\frac{-D(A,B)}{\lambda}\right), \quad (3)$$

де *D (A, B)* – евклідова відстань між двома нейронними вузлами *A* і *B*, а $\lambda$ – щільність з'єднань. Параметр *C* залежить від типу пресинаптичних і постсинаптичних нейронів, тобто від того, чи є вони збудливими (*Ex*) або тормозними (*Inh*) клітинами. При моделюванні параметр *C* встановлюється як: $C_{Ex-Ex}$=0.3 (для зв'язків між двома збуджуючими нейронами), $C_{Ex-Inh}$=0.2 (для сполуки між збуджуючими та тормозними нейронами), $C_{Inh-Inh}$=0.1 (для сполуки між двома тормозними нейрони), $C_{Inh-Ex}$=0.4 (для зв'язків між тормозними і збуджуючими нейронами. Початкова синаптична вага визначається $W_0$ = 0,0045 мкСім/см$^2$. Зміна синаптичної ваги обмежена між 0 та 10 $W_0$. Синаптичні затримки між двома нейронами вибираються випадково між 1 мс і 2 мс.




**а** **б**

**Рис. 6. а - типові тонічні спайки, що генерується мультистабільним нейроном; б - тонічний процес пачок розрядження мультистабільного нейрона**

Вихідний шар представлений простим бі-стабільним нейроном з активними дендритними структурами, які збирають всі синаптичні входи від нейронів другого внутрішнього шару і здатні генерувати одиночні спайки у відповідь на велику кількість одночасних синаптичних входів. Вихідний нейрон навчається працювати наступним чином: генерація вихідного спайка відбувається тільки тоді, коли R-пік комплексу QRS виявлено мережею і не генерує спайк, коли не виявлено R-пік. Оновлення синаптичних ваг відключаються після інтервалу часу $T_i$. Часовий інтервал від 0 (початок семплу ЕКГ) до $T_i$ є фазою тренування спайкової нейронної мережі. Тривалість тренувальної фази $T_i$ фіксована і мала два варіанти: 10 та 30 секунд. Вплив збільшення фази тренування буде показано у наступному розділі результатів. Під час цієї фази вагові коефіцієнти оновлюються за допомогою спайк-часової пластичності (STDP). STDP є правилом для посилення або послаблення зв'язків між нейронами за ступенем синхронної генерації спайків [16, 17, 21]. Це правило визначається ваговою функцією *W(x)*, що визначає порядок зменшення або збільшення сили зв'язку в залежності від синхронності спайків між пре- і постсинаптичними нейронами, вона виражається наступним чином:

$$\Delta W = \begin{cases} A_+ \exp^{\left(\frac{\Delta t}{\tau_+}\right)}, \; for \; \Delta t > 0 \\ A_- \exp^{\left(\frac{\Delta t}{\tau_-}\right)}, \; other \; wise \end{cases} \quad (4)$$

Всі вхідні сирі ЕКГ дані для тестування мережевого навчання та алгоритму детектування QRS розділено на дві категорії: ЕКГ-сигнали з бази MIT-BIH ECG, а також сигнали ЕКГ, які зареєстровані в лабораторії за допомогою сертифікованого ЕКГ-пристрою (*CE, FDA* сертифікація). Всі записи з бази даних MIT-BIH ECG були обрані випадковим чином. Частота дискретизації вхідних даних постійна та дорівнює 250 Гц. Абсолютні значення амплітуди вимірюються у мікровольтах. Всі модельні дослідження, аналіз та візуалізація результатів, обговорені в даній роботі, розроблено в середовищі MAT LAB. Оцінка середньої похибки SNN порівнюється з роботою детермінованого алгоритму, заснованого на модифікованому алгоритмі Пена-Томпкнісна [22], описаному в попередній роботі.

*VHDL модель та апаратна реалізація на ПЛІС.* Кожну описану нейрональну структуру (див. рис. 2*а*) синтезовано та змодельовано за допомогою VHLD. Вся структура має три-стабільні стани і здатна генерувати на виході тонічний спайки, пачки розрядів, або стабільно перебуває на рівні низького, або високого потенціалу (стани *down-state* та *up-state*). Така ситуація симулює над-слабку активацію нейрона і навпаки над-сильну активацію, що збуджує увесь нейрон. Проміжний стабільний стан (*mid-state*) характеризується наявністю вихідних імпульсів, або генерацією спайків. Частота генерації вихідних імпульсів прямо пропорційна загальній інтенсивності вхідних синапсів. Осцилятор з заданою тактовою частотою підключений до вихідного генератора в цьому випадку, інакше на виході встановлюється значення напруги вихідного сигналу, що відповідає високому логічному, або низькому логічному рівню. Нейрон у реалізованій моделі розділений на чотири окремих модуля: вхідні блоки (дендрити), пороговий блок (сома), генератор вихідних сигналів (аксон).

Для розробки вбудованого програмного забезпечення для ПЛІС використана мова програмування VHDL. Для моделювання та синтезу використані програмні засоби ModelSim і WebPACKTM ISE 13.3. Синтезований код протестований на мікросхемі SPARTAN-3E XC3S100E з використанням комплекту розробки BASYS II DIGILENT у пакеті ISE WebPackTM [23]. Використовувався повний дуплексний зв'язок

ПЛІС плати із ПК за допомогою інтерфейсу універсальної асинхронної передачі (UART). Швидкість обміну даними – 115200 біт/сек, довжина слова – 8 біт, парність – нема, стоп-біти – 1 біт. Дані ЕКГ в цифровому форматі поступають до ПЛІС через інтерфейс UART безпосередньо до вхідного нейронного шару. Крім того, вхідні сигнали введення/виводу нейрона виведені на ПЛІС платі на відповідні цифрові порти G12 (порт *InNN_in*), M5 (порт *InNN_out*). Вихід нейрону вихідного шару також спостерігався за допомогою осцилографа на виході M11 (порт *OutNN_out*) плати в реальному часі. На рисунку 7*a* показана еквівалентна електрична схема розробленої системи. UART TX-вивід, пов'язаний з P6 (*TX*), RX-вивід з M4 (*RX*), відповідно. Для управління процесом додано кнопку користувача, що підключено до вхідного порту A7. Процес початкового процесу навчання відображається за допомогою світлодіодного індикатору LED2. Поточний стан системи відображається за допомогою чотирьох панелей семи-сегментних індикаторів (DS1 - DS4).

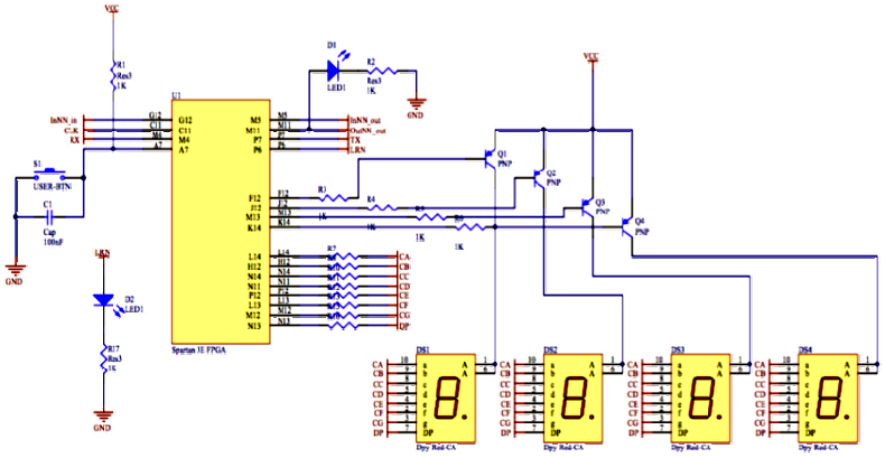


**Рис. 7. Еквівалентна електрична схема прототипу пристрою на базі платформи BASYS II DIGILENT**

Для перетворення сигналу UART-TTL на стандартний USB-інтерфейс вибрано типовий перетворювач USB-UART на основі інтегрального рішення CH341A (не показано на схемі). Вихідні спайки поступають від ПЛІС плати до ПК, де вони зберігаються до стандартного файлу в текстовому форматі з мітками часу для подальшої візуалізації та аналізу.

## Головні результати

У серії експериментів описано ефективність оцінки запропонованого SNN апарату для виявлення QRS комплексів та R-піків в реальному часі, а також порівняння результатів точності з референтним опорним алгоритмом, що працює за принципом кінцевого автомата. Для оцінки точності запропонованої системи для кожної пари R-піків обчислюється інтервал між двома сусідніми R-піками, або RR інтервали, і визначається параметр середнього проценту похибки відхилення (*MAPE*) RR інтервалів, розрахований як:

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}\left(\frac{|a_i - p_i|}{a_i}\right) * 100 \qquad (5)$$

Параметр *MAPE* тут є різницею між фактичним інтервалом RR $a_i$ і розрахунковим інтервалом RR $p_i$ і $N$ - числом однохвилинних сегментів у даному записі ЕКГ. По-перше, модель розроблена і змодельована за допомогою середовища VHDL ModelSim, після отримання стабільних результатів рішення перенесено на ПЛІС.

*Точність детектування QRS комплексу за допомогою SNN.* Часова діаграма спайків для вхідного, внутрішнього та вихідного шарів, отримана з VHDL-моделі, показана на рисунку 8.

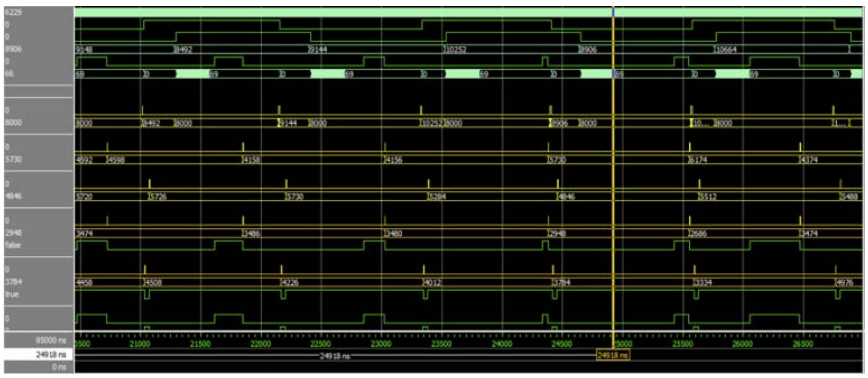


**Рис. 8. Часова діаграма моделювання VHDL-структури, представлені пульсації і з часом вхідних, частини внутрішніх і нейронів вихідного шару**

Приклад співвідношення вихідної генерації мережі у часі та вхідного ЕКГ-сигналу, що подавався до вхідного нейронального шару показано на рисунку 9. Необхідно зазначити, що показаний приклад можна

назвати випадком добре навченої мережі. Збільшення концентрації вхідних спайків на дендритній структурі нейрона вихідного шару призводить до генерації вихідного спайку, що пояснюється наявністю R-піку в певний момент часу у вхідному сигналі. З часової діаграми можна бачити, що вихідні спайки досить чітко корелюють з часовими мітками QRS комплексів вхідного ЕКГ-сигналу. Для підкреслення цього, моменти R-піків були виділені на нижньому графіку рисунка 9, як червоні пунктирні вертикальні лінії.

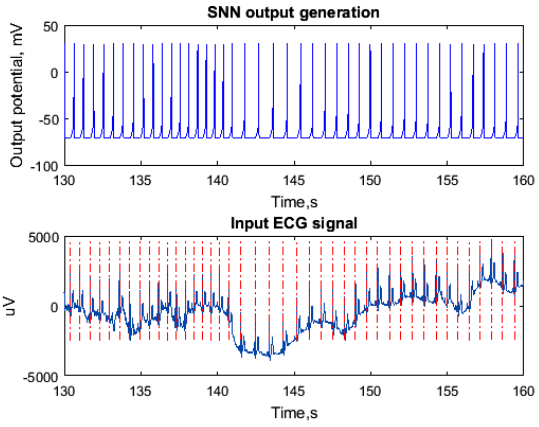



**Рис. 9. Залежність імпульсів просторово-часового кодування нейрону вихідного шару (верхній графік) від вхідного сигналу ЕКГ (нижній графік)**

Розвиток нейронної активності SNN із часом показано на рисунку 10*а* для випадку тривалості початкової фази навчання мережі $T_i$=10 сек, та на рисунку 19*б* для початкової фази навчання $T_i$=30 сек.

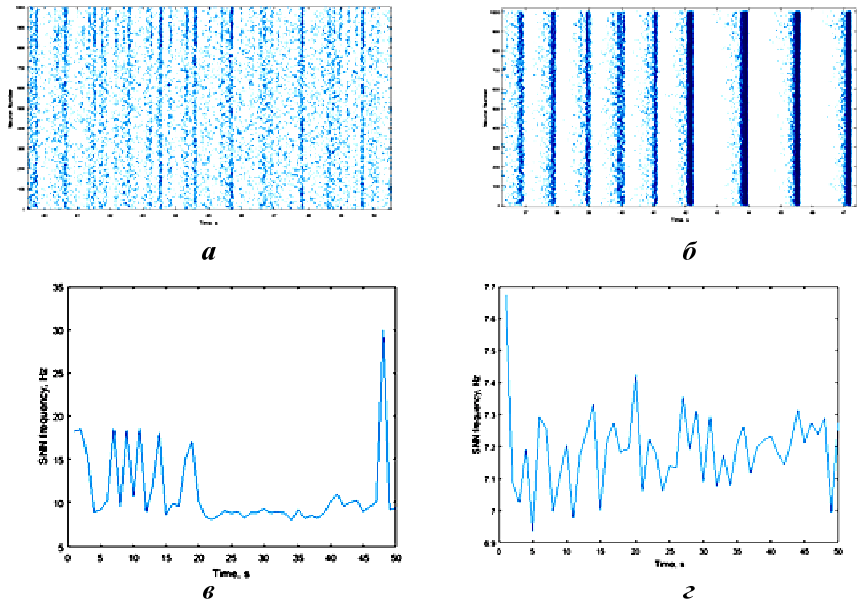



**Рис. 10. *а* - спайкова активність, зареєстрована з нейронів внутрішнього шару після фази початкового тренування мережі тривалістю 10 секунд; *в* - відповідна частота генерації спайків мережі із часом; *б* - спайкова активність, зареєстрована з нейронів внутрішнього шару для тривалості тренувальної фази 30 секунд; *г* - відповідна частота генерації спайків мережі з часом**

Додатково можна проаналізувати навчальний процес мережі за допомогою частоти генерації спайків у мережі. Рисунки 10*в* та *г* ілюструють частоту генерації всіх спайків мережі з часом для випадків *а* та *б,* відповідно. Отриманий результат легко пояснити: коли мережеві нейрони тренуються до генерації спайків після специфічного моменту, що виявляється у вхідному сигналі, комплекс QRS в нашому випадку, тоді основний компонент частоти генерації мережі буде прагнути до частоти вхідного сигналу, тобто частоти появи R-піків. Цей процес успішно спостерігається на малюнку 15*г*. Також встановлено, що час попереднього тренування не може бути менший за $T_i$=30 сек, для наступного коректного виділення головних ознак ЕКГ-сигналу.

Алгоритм успішно випробуваний на десяти різних записах ЕКГ, тривалість яких обмежена $t$=300 секундами. Звіт про точність і результати перевірки SNN для кожного запису наведено в таблиці 1. На рисунку 11 показано порівняльне співвідношення середньої точності оцінки RR інтервалів з використанням SNN підходу і опорним алгоритмом для п'яти записів MIT-BIH і п'яти записів внутрішньої бази даних (intdb). Найкраще значення *MAPE* склало 0.10%, а в гіршому випадку – 3.0%. Як видно з рисунку, середнє значення *MAPE*, що використовує мережевий підхід, становить менше 2% для всіх записів. Для бази даних MIT-BIH, *MAPE* змінюється між 0.1% і 2.0%, в середньому дорівнює –1.05%. Для внутрішньої бази даних

ЕКГ (intdb) *MAPE* змінюється між 0.87% і 2.02%, при середньому *MAPE*–1.4%. *MAPE* для референтного методу коливається в межах від 0.3% до 3.50% при середньому значенні –1.9%.

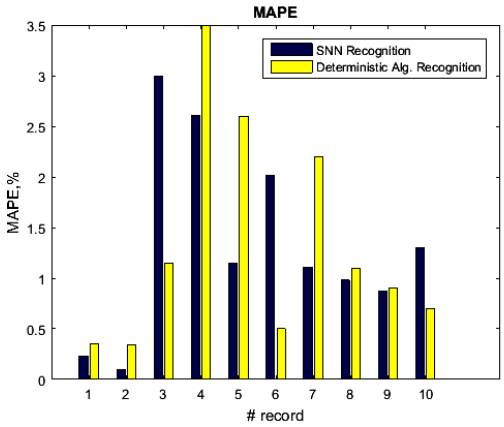



**Рис. 11. Значення MAPE, розраховані для десяти різних ЕКГ записів (п'ять записів, обраних випадково з бази даних ЕКГ MIT-BIH і п'ять з внутрішньої ЕКГ бази даних intdb): фіолетові смуги – середня похибка розпізнавання SNN після етапу навчання; жовті смуги – середня похибка детектування за допомогою референтного методу**

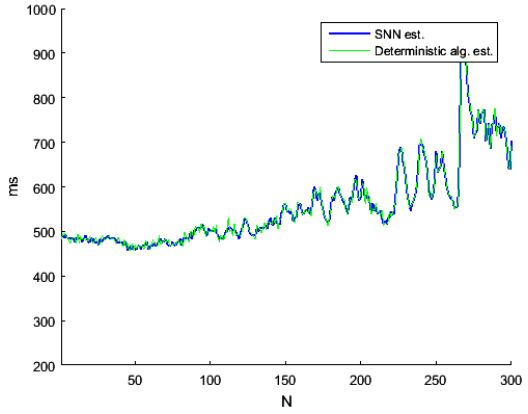



**Рис. 12. Порівняльний графік послідовності отриманих RR інтервалів для випадково обраного запису ЕКГ тривалістю 300 секунд. Синя суцільна лінія показує результат оцінки інтервалів RR за допомогою SNN, зелена суцільна лінія показує ту ж синхронізовану послідовність отриману за допомогою референтного алгоритму, обчисленого на ПК. Вісь x – номер RR інтервалу; вісь y – розмір RR інтервалу в мілісекундах**

Таблиця 1

**Показники точності роботи мережі**

| № Запису | Всього R-піків | Позитивні похибки, № R-піки | Негативні похибки, № R-піки | MAPE, % |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 311 | 0 | 1 | 0.32 |
| 2 | 270 | 1 | 0 | 0.10 |
| 3 | 354 | 2 | 8 | 3.00 |
| 4 | 298 | 1 | 6 | 2.61 |
| 5 | 367 | 1 | 3 | 1.15 |
| 6 | 405 | 1 | 4 | 2.02 |
| 7 | 434 | 2 | 2 | 1.11 |
| 8 | 305 | 2 | 1 | 0.98 |
| 9 | 321 | 1 | 2 | 0.87 |
| 10 | 287 | 1 | 2 | 1.30 |

Отримана послідовність RR інтервалів за допомогою SNN показана на рисунку 12, в парі з масивом інтервалів, отриманим за допомогою детермінованого чіткого алгоритмічного підходу. Середня різниця між інтервалами SNN результуючого масиву RR і відповідними RR інтервалами референтного методу не перевищує 0.5% для наведеного прикладу.

## Висновки

Основна функціональність спайкової нейронної мережі реалізована на апаратній архітектурі ПЛІС і впроваджена на платі DIGILENT BASYS II SPARTAN-3E XC3S100E. Продемонстровано роботу прототипу пристрою, для задачі розпізнавання QRS комплексу ЕКГ сигналу. Пристрій з інтерфейсом передачі даних UART розроблено та перевірено на ЕКГ записах баз даних MIT-BIH та сигналів, отриманих з сертифікованого ЕКГ-пристрою. Основні результати вимірювань: а) запропонована SNN з алгоритмом навчання STDP дають стабільний та точний розв'язок розпізнавання протягом всього часу вхідного сигналу; б) фаза початкової підготовки для такого типу мережі і відповідних характеристик сигналу повинна становити не менше ніж 30 секунд; в) *MAPE* для добре навченої системи не перевищує 1.2% для ЕКГ записів тривалістю 300 секунд; г) відсутність необхідності в системі контролю для подальшого успішного виявлення ознак на ЕКГ-сигналі. Надалі буде продовжено досліджування з визначенням більшої кількості ознак сигналу ЕКГ (наприклад ,такі як P, Q, R, S, T-піки і відповідні інтервали). Крім того, розрахунки системи без вчителя сприяють персоналізованому медичному обслуговуванню, дозволяючи безпосередньо навчати систему під конкретного пацієнта, не вимагаючи дорогої анотації даних для навчання мережі. Запропонований підхід представляє три нові внески: (а) методику безпосереднього кодування спайків з ЕКГ, без необхідності оцифровувати аналоговий ЕКГ-сигнал і таким чином досягати значного зниження щільності даних, а отже і енергоспоживання; (б) попередня обробка та фільтрація даних на вході збільшує якість навчання SNN в обчислювальній моделі; (в) ефективна та стабільна реалізація розрахункової моделі

на базі прототипу ПЛІС-пристрою. Ці результати свідчать про те, що запропонований підхід може бути дуже добре інтегрований у майбутні апаратні засоби, наприклад, портативні та переносні пристрої, забезпечуючи значний час автономної роботи та полегшуючи використання для кінцевих користувачів.

**References**

1. T. Tekeste, H. Saleh, B. Mohammad, A. Khandoker, M. Elnaggar, A nano-watt ecg feature extraction engine in 65nm technology, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs PP (99) (2017) 1–1. doi: 10.1109/TCSII. 2017.2658670.

2. K. Arbateni, A. Bennia, Sigmoidal radial basis function ANN for QRS complex detection, Neurocomputing 145 (2014) 438 – 450. doi: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.05.009.

3. N. Ravanshad, H. Rezaee-Dehsorkh, R. Lotfi, Y. Lian, A level-crossing based qrs-detection algorithm for wearable ecg sensors, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics 18 (1) (2014) 183–192.

4. S. Jain, M. Ahirwal, A. Kumar, V. Bajaj, G. Singh, QRS detection using adaptive filters: A comparative study, ISA Transactions 66 (2017) 362–375. doi: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.09.023.

5. Karimipour, M. R. Homaeinezhad, Real-time electrocardiogram p-qrs-t detection delineation algorithm based on quality-supported analysis of characteristic templates, Computers in Biology and Medicine 52 (2014) 153–165. doi: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2014.07.002.

6. N. Van Helleputte, M. Konijnenburg, J. Pettine, D.-W. Jee, H. Kim, A. Morgado, R. Van Wegberg, T. Torfs, R. Mohan, A. Breeschoten, et al., A 345 μw multi-sensor biomedical soc with bio-impedance, 3-channel ecg, motion artifact reduction, and integrated dsp, IEEE Journal of Solid-State Circuits 50 (1) (2015) 230–244.

7. Z. Krasauskas, L. Telksnys, Ubiquitous personal heart rate long distance transmission to the treatment centers based on smart mobile phone application, in: 2015 IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/AIEEE.2015.7367297.

8. Wilson, P., Metcalfe, B., Graham-Harper-Cater, J., & Bailey, J. A. "A reconfigurable architecture for real-time digital simulation of neurons". 2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys). doi: 10.1109/intellisys.2017.8324340.

9. J.A. Bailey et.al., "Behavioral simulation and synthesis of biological neuron systems using synthesizable VHDL", Neurocomputing, Elsevier B.V., pp. 2392-2406, 2011, doi: 10.1109/BMAS.2008.4751231.

10. P. U. Diehl, M. Cook, Unsupervised learning of digit recognition using spiketiming-dependent plasticity, Frontiers in computational neuroscience 9 (0) (2015) 0–0.

11. Tavanaei, A. S. Maida, A spiking network that learns to extract spike signatures from speech signals, Neurocomputing 240 (2017) 191–199.

12. D. Du, K. Odame, A bio-inspired ultra-low-power spike encoding circuit for speech edge detection, in: Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2011 IEEE, IEEE, 2011, pp. 289–292.

13. Podili, A., Zhang, C., & Prasanna, V. "Fast and efficient implementation of Convolutional Neural Networks on FPGA". 2017 IEEE 28th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP). doi: 10.1109/asap.2017.7995253.

14. Schaffer J. D. Evolving spiking neural networks: A novel growth algorithm corrects the teacher // Proc. Of2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA). 26-28 May 2015, pp. 1–8.

15. Yongqiang Cao, Yang Chen, Deepak Khosla. Spiking Deep Convolutional Neural Networks for Energy-Efficient Object Recognition // Proc, of International Journal of Computer Vision. May 2015, Volume 113, Issue 1, pp 54–66.

16. HunsbergerE., EliasmithC. Spiking Deep Networks with LIF Neurons. - arXiv: 1510.08829, 2015.

17. R.R. Borges et.al., "Effects of the spike timing- dependent plasticity on the synchronization in a random Hodgkin-Huxley neuronal network", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Elsevier B.V., pp. 12-22, 2015, doi: 10.1016/j.cnsns.2015.10.005.

18. J. A. Henderson, T. A. Gibson, J. Wiles. Spike Event Based Learning in Neural Networks. - arXiv: 1502.05777, 2015.

19. E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, IEEE Transactions on neural networks 14 (6) (2003) 1569–1572

20. E.M. Snezhko, D.V. Chernetchenko, Dynamics of electrical potentials of neuron networks models with non-linear activation functions, Vestnik DNU, 2012.

21. Diehl P.U. Neil D., Binas, J., Cook, M., Liu, S.C., Pfeiffer, M. Fast-Classifying, High-Accuracy Spiking Deep Networks Through Weight and Threshold Balancing // Proc. of IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2015.

22. J. Pan and W. J. Tompkins, "A Real-Time QRS Detection Algorithm," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-32, no. 3, pp. 230–236, 1985.

23. Yalamanchili. S:VHDL Starter's Guide (2nd Ed); Prentice-Hall. 2005.

Рецензія/Peer review : 9.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-134-140
УДК 621.396.2

І.С. ПЯТІН, В.В. МІШАН, Д.М. ДУКАЧ
Хмельницький національний університет

# ІНТЕРПОЛЯЦІЯ І ДЕЦИМАЦІЯ СИГНАЛІВ У ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

*Технологія програмно-керованого радіо (SDR) дозволяє впроваджувати бездротові пристрої, які підтримують декілька радіоінтерфейсів і форматів модуляції. Стаття присвячена дослідженню впливу інтерполяції і децимації на якість передачі сигналів у цифрових системах зв'язку. У якості інтерполятора і дециматора були обрані CIC-фільтри, оскільки вони не потребують операцій множення. Компенсаційні фільтри згладжують нерівномірність частотної характеристики CIC фільтра. У якості формуючих фільтрів на боці передавача і приймача використані фільтри з характеристикою квадратного кореня з піднятого косинуса, що у підсумку забезпечує мінімальну міжсимвольну інтерференцію. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що інтерполяція і наступна децимація сигналу супроводжується ефектами підсилення сигналу, зменшенням часу наростання імпульсу, зменшенням коефіцієнту якості сигналу, порушенням символьної синхронізації, що збільшується при збільшенні коефіцієнтів інтерполяції і децимації.*

*Ключові слова: програмно кероване радіо, інтерполяція, децимація.*

I.S. PYATIN, V.V. MISHAN, D.M. DUKACH
Khmelnytskyi National University

**ІНТЕРПОЛЯЦІЯ І ДЕЦИМАЦІЯ СИГНАЛІВ У ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ**

*Software-defined radio technology (SDR) allows you to embed wireless devices that support multiple radio interfaces and modulation formats. SDR is a radio frequency communications system that is customizable using software. The following components are configured in the SDR: - mixers for step-up and step-down frequency converters; amplifiers, modulators and demodulators; radio frequency detector; filters. The article is devoted to the study of the effect of interpolation and decimation on the quality of signal transmission in digital communication systems. When performing processing at the informational message rate, the SDR uses Digital Down Converter (DDC) and Digital Up Converter (DUC). The study of interpolation and decimation of signals in digital communication systems and the distortions that arise in this case is an urgent task. CIC filters were chosen as an interpolator and decimator because they do not require multiplication operations. Compensation filters smooth out the uneven frequency response of the CIC filter. Filters with the characteristic of the square root of the raised cosine were used as forming filters on the transmitter and receiver side, which ultimately ensures minimal intersymbol interference. The results obtained allow us to conclude that interpolation and the following signal decimation are accompanied by effects of signal amplification, a decrease in the rise time of the pulse, a decrease in the signal quality factor, a violation of symbol synchronization, which increase with increasing interpolation-decimation coefficients.*

*Keywords: software defined radio, interpolation, decimation.*

**Постановка проблеми**

Основне завдання цифрової системи зв'язку – надійно передавати інформацію з одного місця в інше через канал зв'язку. [1] Технологія програмно-керованого радіо (SDR) дозволяє впроваджувати бездротові пристрої, які підтримують декілька радіоінтерфейсів і форматів модуляції. Для забезпечення цього SDR використовує платформу Field Programmable Gate Array (FPGA) або цифрові сигнальні процесори (DSP).

SDR – це система бездротового зв'язку, що працює на радіочастоті та налаштовується за допомогою програмного забезпечення. Цифрова децимація і інтерполяція широко використовується в сучасних системах зв'язку з різними частотами дискретизації, для стиснення і відновлення даних, для зменшення обсягів пам'яті зберігання даних, для збільшення швидкості передачі даних, для збільшення продуктивності систем з обробкою даних на різних швидкостях тощо. Так, наприклад, реалізація вузькосмугових цифрових КІХ-фільтрів вимагає дуже великої кількості коефіцієнтів, і децимація даних може істотно знизити розмір фільтра і підвищити швидкість їх обробки. Платформи SDR широко використовуються в різних телекомунікаційних системах зв'язку, оскільки вони дозволяють змінювати конфігурацію апаратного забезпечення. Головна мета SDR – максимальне перенесення операцій обробки сигналу у цифрову форму.

Для високочастотних сигналів використовується смугова дискретизація [2] (under sampling), яка дозволяє обійти обмеження, що накладаються теоремою Котельникова для обробки вузькосмугових сигналів.

Якщо ширина смуги частот $B$, що займає сигнал, набагато менша нижньої або верхньої граничних частот ( $f_L$ та $f_H$ ) його спектра, використовують теорему про смугову дискретизацію:

$$\frac{2f_H}{n} \le F_S \le \frac{2f_L}{n-1},$$

де $n = f_H / B$, $n$ округлене до найбільшого цілого числа

Для збереження інформації про сигнал, частота дискретизації повинна бути рівною або більшою ніж подвоєна ширина його смуги частот.

При смуговій дискретизації оцифровуванню піддається не вся смуга частот, а лише невелика її частина. При цьому для захисту від накладення спектрів необхідно використовувати смугові аналогові фільтри. Варто також відзначити, що смугова дискретизація дозволяє одночасно з оцифровуванням сигналу зробити перенесення його спектра на низьку частоту. Дослідження інтерполяції і децимації сигналів у

цифрових системах зв'язку та спотворень, що виникають при цьому, є актуальною задачею.

**Передавач і приймач за технологією програмно-керованого радіо**

Платформи програмно керованого радіо (SDR) використовують Digital Down Converter (DDC) і Digital Up Converter (DUC) при виконанні обробки в основній смузі частот. Цифрові радіоприймачі вимагають швидких перетворювачів АЦП для оцифровки обмеженого за смугою сигналу радіочастоти або проміжної частоти, що має високу швидкість передачі даних. DDC у цифровому радіоприймачі використовується для перенесення смуги частот вниз за спектром, не порушуючи критерій Найквиста для пропускної здатності повідомлення. Частота дискретизації зменшується і в свою чергу вимоги до фільтру і подальша обробка сигналу стає легше здійсненною. DUC у цифровому радіопередавачі використовується для перенесення спектра комплексного модульованого сигналу з області низьких частот на частоту несучої. Сигнал основної смуги частот фільтрується і транслюється з використанням більш високої частоти дискретизації для модуляції на несучій частоті з прямим цифровим синтезом (DDS). DUC виконує формування імпульсу вхідного сигналу і модуляцію на проміжній частоті. Багатоступенева реалізація цих перетворювачі частоти дискретизації є обчислювально ефективною.

Загальна структурна схема передавача цифрової системи зв'язку [3] зображена на рис. 1.

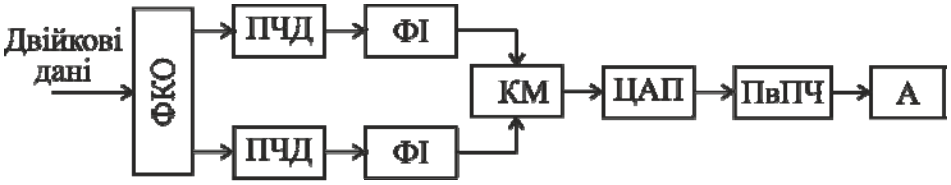



**Рис. 1. Структурна схема передавача цифрової системи зв'язку (ФКО – формувач комплексної обвідної модульованого сигналу; ПЧД – підвищувач частоти дискретизації; ФІ – формувач імпульсу; КМ – квадратурний модулятор; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ПвПЧ – підвищуючий перетворювач частоти; А – антена)**

Інформаційні біти перетворюються в символи QPSK шляхом створення сигнального сузір'я (кодування Грея). Символ QPSK є 2-вимірним і представляється у вигляді ( $a_I(i)$ ; $a_Q(i)$ ), що входить у сигнальне сузір'я цифрової модуляції. $a_I(i)$ представляє рівень амплітуди синфазної компоненти, а $a_Q(i)$ представляє рівень амплітуди квадратурної компоненти.

Наприклад, у QPSK, $a_I(i)$ і $a_Q(i)$ можуть набувати значень +1 або -1, тому ( $a_I(i)$ ; $a_Q(i)$ ) може бути одним з наступних чотирьох можливих кортежів: (+1; +1); (+ 1; -1); (-1; +1); (-1; -1). Це відображення може бути реалізовано за допомогою таблиці відповідності. Послідовності $\{a_I(i), a_Q(i)\}$ перетворюються з підвищенням частоти дискретизації з нульовою затримкою і надходять на формувач імпульсів.

Інтервал часу між імпульсами, виражений в секундах, називається символьним інтервалом, рівним $T$ секундам і рівним довжині $U$ відліків формування імпульсу. Виходи фільтра – формувача імпульсу, $I(n)$ і $Q(n)$, є синфазними і квадратурними сигналами. Ці сигнали модулюються цифровими квадратурними несучими з частотою $f_0$. Цифрова несуча частота $f_0$ має одиницю циклів / вибірок, оскільки вона дорівнює аналоговій частоті (періоди / секунда), нормалізованій по частоті дискретизації (вибірка / секунда).

У загальному випадку при проектуванні системи зв'язку необхідно враховувати такі основні фактори, що впливають на сигнал при його поширенні в каналі зв'язку: вплив адитивного білого гаусового шуму; частотний і фазовий зсув сигналу, який може бути викликаний взаємним рухом антени передавача і приймача або неузгодженістю їх гетеродинов, викликаним нестабільністю джерел опорної частоти; затримка сигналу в каналі зв'язку на розповсюдження від антени передавача до антени приймача і в фідерних системах; завмирання, викликані багатопроменевим поширенням сигналу від передавача до приймача, явищами рефракції в атмосфері і перевідбиваннями від різних об'єктів. При моделюванні систем зв'язку на персональному комп'ютері особливу увагу необхідно приділити питанням затримки сигналу в каналі зв'язку. Оскільки моделювання на комп'ютері принципово може бути тільки дискретним в області часову, для проведення коректних досліджень систем синхронізації приймального пристрою необхідно створювати дробову затримку в каналі зв'язку. На практиці така необхідність відсутня, оскільки радіосигнали випромінюються в ефір в аналоговому вигляді. При моделюванні подрібнена затримка може бути створена за допомогою фільтрів - інтерполяторів (наприклад, за допомогою фільтра-інтерполятора Фарроу).

Структурна схема приймача QPSK сигналу [3] представлена на рис. 2.

Радіочастотний прийнятий сигнал спочатку перетворюється з пониженням частоти в сигнал проміжної частоти (ПЧ). Сигнал ПЧ тоді дискретизується за допомогою автономного генератора зі швидкістю $1/T_{вх}$ вибірок в секунду. Отриманий сигнал, позначений як $r_{пр}(mT_{вх})$, перетворюється з пониженням частоти в основну смугу з використанням двох квадратурних несучих на частоті $f_0$ з подальшою узгодженою фільтрацією для отримання синфазних і квадратурних сигналів $x_I(m)$ і $x_Q(m)$. Цифрові сигнали $x_I(m)$ та $x_Q(m)$ передаються через цикл відновлення символьної синхронізації. Далі сигнал піддається пониженню частоти дискретизації для відновлення переданих даних QAM, тобто $b_I(i)$

для синфазної гілки і $b_Q(i)$ для квадратурної гілки. В ідеальному випадку $b_I(i) = a_I(i)$ і $b_Q(i) = a_Q(i)$. Пристрій для формування імпульсів і узгоджений фільтр реалізовані для подолання ефекту міжсимвольних завад (ISI). Одним з поширених прикладів мінімізації ISI є формувати імпульси $a_I(i)$ і $a_Q(i)$ за допомогою фільтра з характеристикою піднятого косинуса.

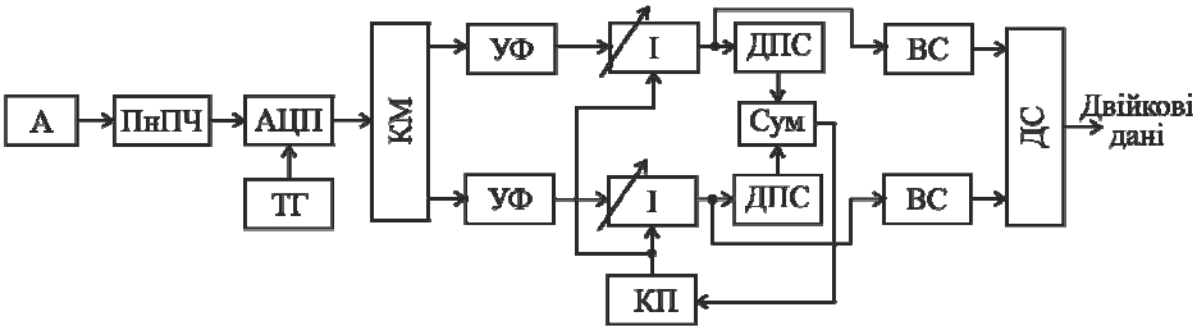



**Рис. 2. Структурна схема приймача цифрової системи зв'язку (А – антена; ПнПЧ – понижуючий перетворювач частоти; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ТГ – тактовий генератор; КМ – квадратурний модулятор; УФ – узгоджений фільтр; І – інтерполятор; КП – контурний процесор; ДПС – детектор помилки синхронізації; Сум – підсумовувач; ВС – відновлювач символу; ДС – детектування символу)**

**Підвищення частоти дискретизації і формування імпульсу**

Для подальшої мінімізації дій каналу передачі AWGN, фільтр з характеристикою піднятого косинусу ділиться рівномірно між передавачем і приймачем, так що фільтр-формувач імпульсу і узгоджений фільтр є еквівалентним фільтру з характеристикою квадратного кореня з піднятого косинусу. Підвищення частоти дискретизації є ключовою операцією в декількох цифрових методах обробки, таких як інтерполяція і символьна синхронізація.

На рис. 3 показана Simulink-модель кола підвищення частоти дискретизації синфазної і квадратурної компонентів на виході низькочастотного QPSK модулятора. У моделі U = 5 і форма імпульсу у передавачі і відповідне значення у приймачі однакові за формою фільтра квадратного кореня з піднятого косинуса.

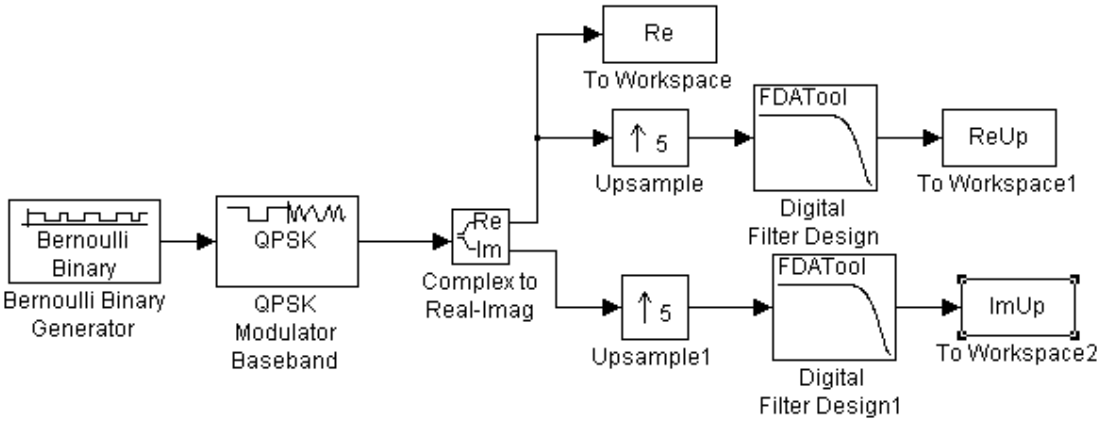



**Рис. 3. Simulink-модель кола підвищення частоти дискретизації синфазної і квадратурної компонентів на виході низькочастотного QPSK модулятора**

Імпульсна характеристика фільтру квадратного кореня з піднятого косинуса, що використовується для формування імпульсу, визначається виразом:

$$\begin{cases} 1-\beta+4\beta/\pi, & t=0 \\ \frac{\beta}{\sqrt{2}}\left[\left(1+\frac{2}{\pi}\right)\sin\left(\frac{\pi}{4\beta}\right)+\left(1-\frac{2}{\pi}\right)\cos\left(\frac{\pi}{4\beta}\right)\right], & t=\pm\frac{T}{4\beta} \\ \frac{\sin\left[\frac{\pi t}{T}(1-\beta)\right]+4\beta\frac{t}{T}\cos\left[\frac{\pi t}{T}(1+\beta)\right]}{\frac{\pi t}{T}\left[1-\left(4\pi\frac{t}{T}\right)^2\right]}, & \text{інакше} \end{cases}$$

$T$ – швидкість вхідних символів, $\beta$ – коефіцієнт спадання імпульсу. Рис. 4 показує вибірки модульованого сигналу до та після підвищення частоти дискретизації. На рис. 4, б сигнал дискретизується у моменти часу $t = K\frac{T}{U}$, що в $U$ разів менше вхідної символьної швидкості. $U$ називається коефіцієнтом

інтерполяції, а $K$ є цілим числом. У цьому прикладі $U = 5$.

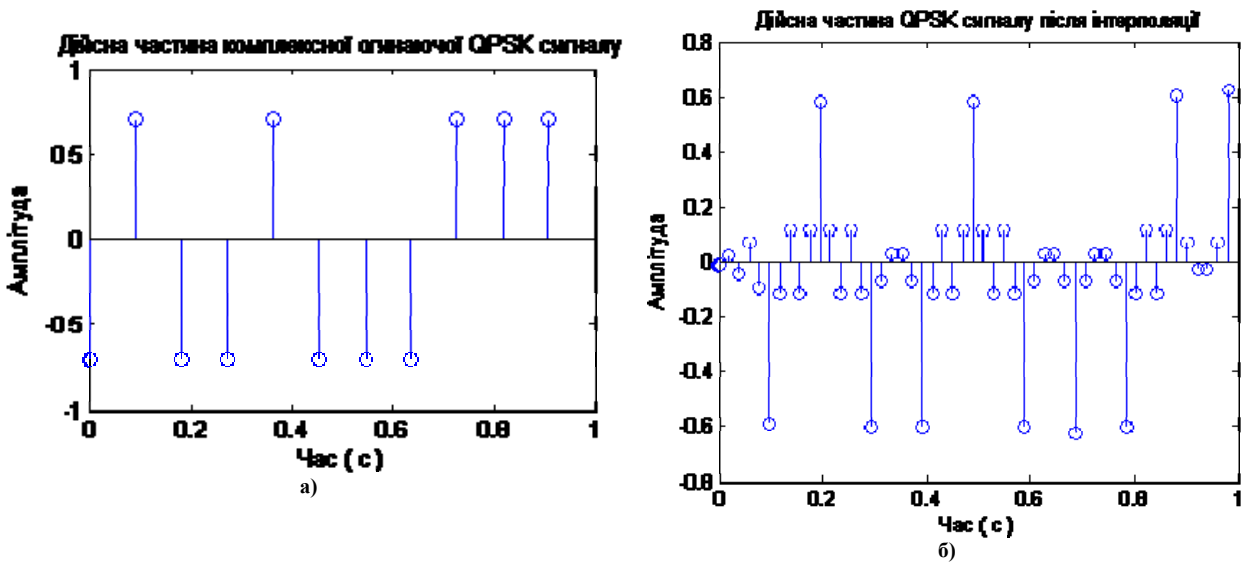



**Рис. 4. Дійсна частина комплексної огинаючої QPSK сигналу:**
**а) на виході низькочастотного модулятора; б) після інтерполяції**

Повертаючись до рис. 3, для ілюстрації послідовності синфазної вибірки, показані на рисунку після формування імпульсів і узгодженого фільтра, не враховуються затримки, викликані фільтрами. Приклад демонструє ідеальний випадок, тому прийнята синфазна послідовність вибірок $x_I(m)$ має таку ж тривалість символу, як $a_I(i)$. В ідеальному випадку комбінований відгук фільтра-формувача імпульсу і підібраний фільтр еквівалентний відгуку RC-фільтра. Це також має на увазі, що дві довжини фільтра SRRC не усікаються.

Смуга пропускання QPSK сигналу після узгодженого фільтра визначається виразом:

$$B = B_{nyquist} + \Delta B$$

де $B_{nyquist} = 1/(2T)$ – ширина смуги Найквіста; $\Delta B = \beta/(2T)$ – надлишкова смуга пропускання фільтра. Ширина смуги сигналу $B$ має одиниці періодів в секунду. Нехай $F_s$ позначає частоту дискретизації, а $T_s = T/U$ як період дискретизації на боці передавача і приймача разом, потім смуга пропускання дорівнює:

$$B = \frac{1+\beta}{2T} = \frac{1+\beta}{2UT_s} = \frac{F_s(1+\beta)}{2U}$$

Якщо частота дискретизації $F_s$ нормалізується до 1 вибірки в секунду, то $B$ стає цифровою смугою пропускання, яка має одиницю періодів на вибірку. Наприклад, з U = 4, β= 0,25, цифрова ширина смуги B дорівнює 1,25/8 періодів на вибірку. Невелика цифрова смуга пропускання має певні переваги при передачі сигналу через інтерполяційний фільтр. У практичному приймачі схема відновлення синхронізації необхідна як для усунення зміщення частоти дискретизації, так і зміщення синхронізації.

**Дослідження інтерполяції і децимації сигналів у середовищі Simulink**

Передискретизація в обробці сигналів – зміна частоти дискретизації цифрового сигналу. Алгоритми передискретизації широко застосовуються при обробці звукових сигналів, радіосигналів і зображень. Відліки сигналу, що відповідають новій частоті дискретизації, обчислюються за наявними відліками і не містять нової інформації. Підвищення частоти дискретизації називається інтерполяцією, зниження – децимацією [4].

Широко застосовується як апаратна (на основі спеціалізованих мікросхем або FPGA), так і програмна (на базі сигнальних процесорів) реалізація алгоритмів передискретизації. Вибір конкретної реалізації алгоритму передискретизації є результатом компромісу між якістю перетворення і його обчислювальною складністю. Основним параметром, що впливає на ці характеристики, є близькість використовуваних цифрових фільтрів до ідеальних. Більш якісні фільтри вимагають великих ресурсів для обчислення.

Передискретизація веде до втрати інформації про сигнал з наступних причин:

при зменшенні частоти дискретизації сигнал необхідно відфільтрувати з метою видалення високочастотних спектральних складових, які не відповідають умовам теореми Котельникова для нової частоти дискретизації;

неминуча неідеальність застосовуваних цифрових фільтрів;

обчислення, що виконуються над цифровими (квантовими за рівнем) сигналами, ведуть до

незворотних помилок округлення.

Таким чином, при збільшенні частоти дискретизації з подальшим зменшенням її до початкового значення якість сигналу буде втрачено (якщо тільки висока частота не кратна низькій).

При демодуляції цифрових сигналів бажано, щоб частота дискретизації сигналу була кратна його швидкості маніпуляції (інакше кажучи, щоб на кожен символ приходилося однакове число відліків сигналу). Однак частота дискретизації вхідного сигналу з АЦП, як правило, фіксована, а швидкість маніпуляції може змінюватися [5]. Приклад використання фільтрів-формувачів імпульсу наведено на рис. 5

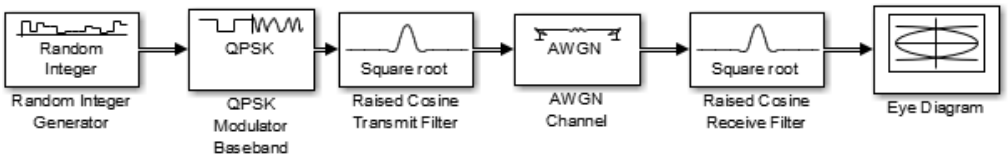



**Рис. 5. Simulink-модель системи зв'язку з фільтрами-формувачами імпульсу**

Без фільтрів підвищення частоти дискретизації око-діаграма зображена на рис. 6.

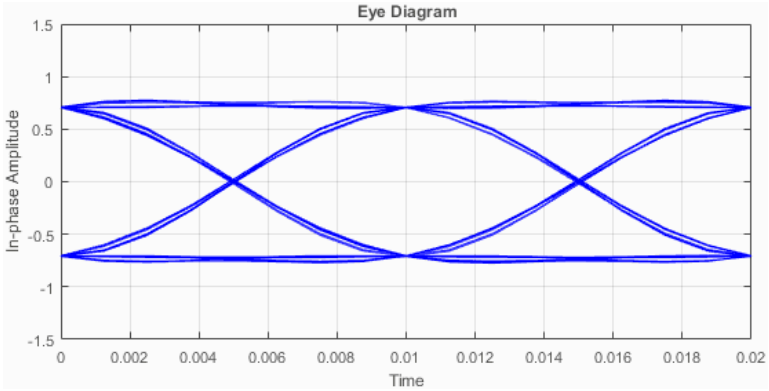



**Рис. 6. Око-діаграма моделі за рис. 5**

З око-діаграми визначаємо, що рівень логічного нуля $I_0 = -0,7$, рівень логічної одиниці $I_1 = 0,7$. Ширина відкритого ока, що відповідає тривалості символу, складає 0,01 с.

При введенні CIC-фільтрів підвищення і пониження частоти дискретизації з коефіцієнтами інтерполяції і децимації рівними 4, Simulink-модель наведена на рис. 7.

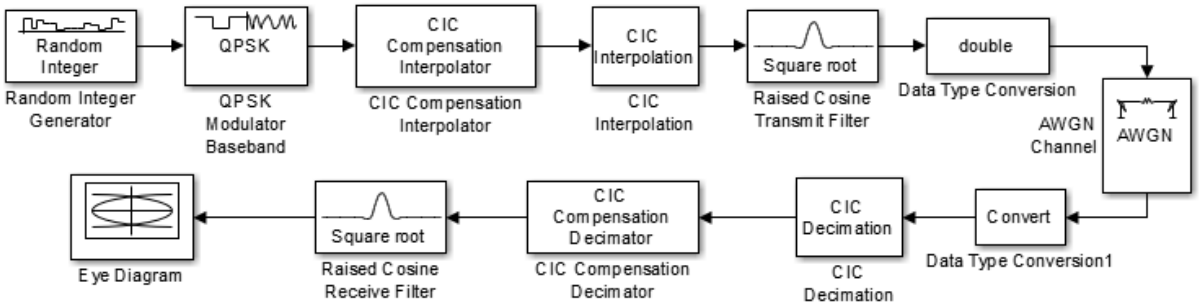



**Рис. 7. Simulink-модель системи з'язку з CIC-фільтрами підвищення і пониження частоти дискретизації**

Фільтри Cascaded integrator-comb (CIC) – це обчислювально ефективні реалізації різних вузькосмугових фільтрів нижніх частот і часто вбудовуються в апаратне забезпечення. Для того, щоб ввести згладжувальну фільтрацію перед децимацією (тобто зменшенням частоти дискретизації) і анти-аліасингову фільтрацію перед інтерполяцією (тобто збільшенням частоти дискретизації), фільтри CIC найкраще підходять і широко використовуються. Різницеве рівняння CIC-фільтра визначається виразом:

$$y(n) = x(n) - x(n-D) + y(n-1),$$

де $x(n)$ – відліки вхідного сигналу, $y(n)$ – вихідний сигнал; $D$ – затримка.

Фільтри CIC мають лінійну фазову характеристику. Вони використовують тільки операції затримки, додавання і віднімання і не вимагають операції множення. Передавальна функція для CIC фільтра задається рівнянням:

$$H(z) = \left[ \sum_{k=0}^{RM-1} z^{-k} \right]^n,$$

де $R$ – коефіцієнт інтерполяції або децимації; $M$ – кількість відліків на секцію; $n$ – кількість секцій у

фільтрі. Око-діаграма сигналу після операцій інтерполяції і децимації має вигляд:

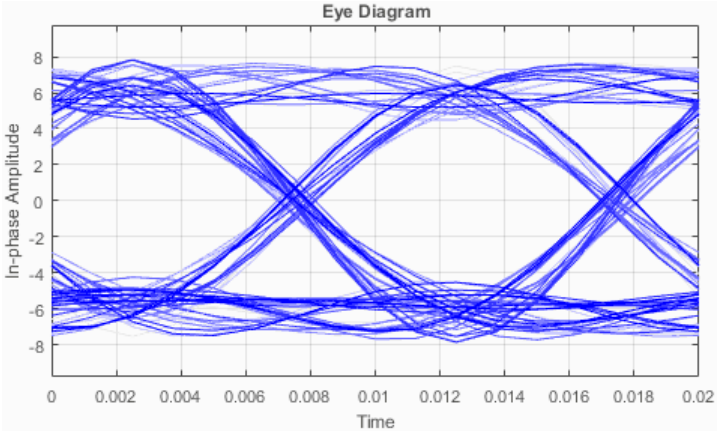



**Рис. 8. Око-діаграма моделі за рис. 7 з коефіцієнтами інтерполяції і децимації, рівними 4**

Рівні логічного нуля і логічної одиниці, відповідно, складають $I_0 = -6$, $I_1 = 6$. Ширина відкритого ока не змінюється і складає 0,01 с. Маємо коефіцієнт підсилення у 9 разів. Відбувся зсув око-діаграми на 0,0025 с.

Якщо коефіцієнт інтерполяції і децимації CIC-фільтрів буде 10, то око-діаграма приймає вигляд, показаний на рис. 9.

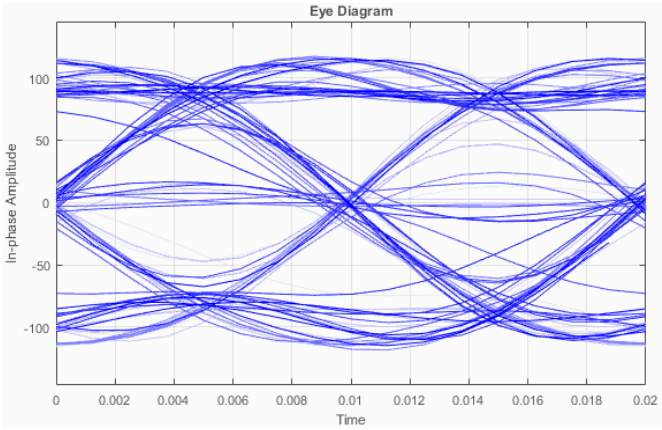



**Рис. 9. Око-діаграма моделі за рис. 7 з коефіцієнтами інтерполяції і децимації, рівними 10**

Спостерігається відсутність синхронізації символів, підсилення рівнів логічного нуля і логічної одиниці у 140 разів. Тривалість символу складає 0,01 с.

## Висновки

У статті проведені дослідження інтерполяції і децимації сигналів у цифрових системах зв'язку. У якості інтерполятора і дециматора були обрані CIC-фільтри, оскільки вони не потребують операцій множення. Компенсаційні фільтри згладжують нерівномірність частотної характеристики CIC фільтра. У якості формуючих фільтрів на боці передавача і приймача використані фільтри з характеристикою квадратного кореня з піднятого косинуса, що у підсумку забезпечує мінімальну міжсимвольну інтерференцію. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що інтерполяція і наступна децимація сигналу супроводжується ефектами підсилення сигналу, зменшенням часу наростання імпульсу, зменшенням коефіцієнту якості сигналу, порушенням символьної синхронізації, що збільшується при збільшенні коефіцієнтів інтерполяції-децимації.

## Література

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

2. Пятін І.С. Дослідження синхронізації цифрових систем зв'язку / І. С. Пятін, І.Ю. Кукал // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 5. – С. 175–183.

3. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис ; пер. с англ. ; под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.

4. Бойко Ю.М. Особливості квазікогерентної обробки сигналів у засобах телекомунікацій з частотною маніпуляцією / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 1. – С. 107–119.

5. Бойко Ю. М. Підвищення завадостійкості блоків оброблення сигналів засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації / Ю. М. Бойко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – Вип. 61. – С. 91–107. – URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11.

6. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – Київ : Логос, 2018. – 227 с. – URL : http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291.

7. Бойко Ю. М. Синтез і аналіз інформаційно-управляючих систем синхронізації засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. науч.-техн. зб. / Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". – Київ, 2017. – Вип. 1’(30). – С. 8–28. – DOI : https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700.

**References**

1. Sklyar B. Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie / B. Sklyar ; per s angl. – 2-e izd., ispr. – M. : Izdatelskij dom «Vilyams», 2003. – 1104 s.

2. Piatin I.S. Doslidzhennia synkhronizatsii tsyfrovykh system zviazku / I. S. Piatin, I.Iu. Kukal // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016. – № 5. – S. 175–183.

3. Prokis D. Cifrovaya svyaz / D. Prokis ; per. s angl. ; pod red. D.D. Klovskogo. – M. : Radio i svyaz, 2000. – 800 s.

4. Boiko J. M.Osoblyvosti kvazikogerentnoji obrobky sygnaliv u zasobah telekomunikatsij z chastotnoju manipulatsieju / J. M. Boiko, I.S. Pyatin // Telekomunikatsijni ta informatsijni tehnologiji. – 2018. – № 1. – C. 107–119.

5. Boiko J. M. Increasing the noise immunity of signal processing units of telecommunications on the basis of the modified synchronization schemes / J. M. Boiko // Visnyk NTUU KPI Seriia: Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia. – No. 61. – S. 91–107. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2015_61_11.

6. Boiko J. M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavadostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavad : monoghrafija / J. M. Boiko, V. A. Druzhinin, S. V. Tolyupa. – Kyjiv : Loghos, 2018. – 227 s. URL: http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291.

7. Boiko J. Synthesis and analysis of information-control systems of synchronization of means of telecommunications / J. Boiko // Interdepartmental scientific technical journal «Adaptive systems of automatic control» 2017. – № 1 (30). – P. 8–28. DOI: https://doi.org/10.20535/1560-8956.30.2017.117700.

Рецензія/Peer review : 24.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-141-146
УДК 537.8; 537.8.029; 537.876; 621.396.67

Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
П.Ф. РОБУЛЕЦЬ
ПАТ «Укртелеком», м. Чернівці

# СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ, ЩО ПЕРЕДАЮТЬСЯ ЧЕРЕЗ ПРОВІДНИКОВУ МЕТАСТРУКТУРУ

*У роботі вивчено можливість передавання гармонічних ЕМ сигналів через метаструктуру із паралельно розміщених провідників, що з'єднує два хвилевода, розміщених на заданій відстані один навпроти одного. Результати моделювання показали можливість передавання сигналів із однією чи декількома гармонічними складовими. Експериментальні дослідження спектральних характеристик показали здатність функціонування такої системи, що підтверджується покращенням передавання сигналів від -23,28 дБм до -4,94 дБм у закритій хвилевідній лінії та від 23,3 дБм до -16,42 дБм – у випадку розміщення хвилеводів на відстані 90 мм один від одного.*

*Ключові слова: середовище із паралельних провідників, передавання гармонічних сигналів, метаматеріали.*

D.A. VOVCHUK, S.D. HALIUK, L.F. POLITANSKYY
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
P.F. ROBULETS
"Ukrtelecom", Chernivtsi

**SPECTRA CHARACTERISTICS OF THE SIGNALS PROPAGATING THROUGH THE WIRE METASTRUCTURE**

*In the paper the possibility of harmonic signal transfer through the metastructure that consists of parallel metallic wires is studied. The investigation setup consists of two rectangular waveguides allocated one in front of another on the defined distance with air gap between them. Wire media (WM) couples the ports that is embedded into each of them with the deep equal approximately the lattice period. It allows to support the near field interaction between ports and WM as well as transfer power of wave in wide frequency range with smoothed transmission dispersion. In first simulation the sine signal with one harmonic component at 2 GHz and in second one more complex signal with five harmonic components (1.7, 1.75, 2, 2.1 and 2.3 GHz)were transferred through WM. The range of frequencies components values can be very wide but preferably there where transmission dispersion is even. The simulation results shown high effectivity of harmonic signal transfer without any distortions with little linear attenuation. Experimental setup used a signal generator to supply the input waveguide port and a spectrum analyser to depict results. The first experimental study included the investigation of harmonic signal propagation through WM when the distance between waveguide was absent (WM inside the closed waveguide transmission line) and the signal enhancement from -23,28 dBm to -4,94 dBm was reached. For the case of the air gap 90 mm between the ports apertures when EM waves are evanescent the signal enhancement from -23,3 dBm to -16,42 dBm was obtained by spectral characteristics analysis and the functionality of this model was confirmed. The presented results can be useful for transmission line development of microwaves both narrow and wide frequency ranges, advancement of wire metamaterials and their usage for different telecommunication applications.*

*Keywords: wire medium, harmonic signal transfer, metamaterials.*

## Вступ

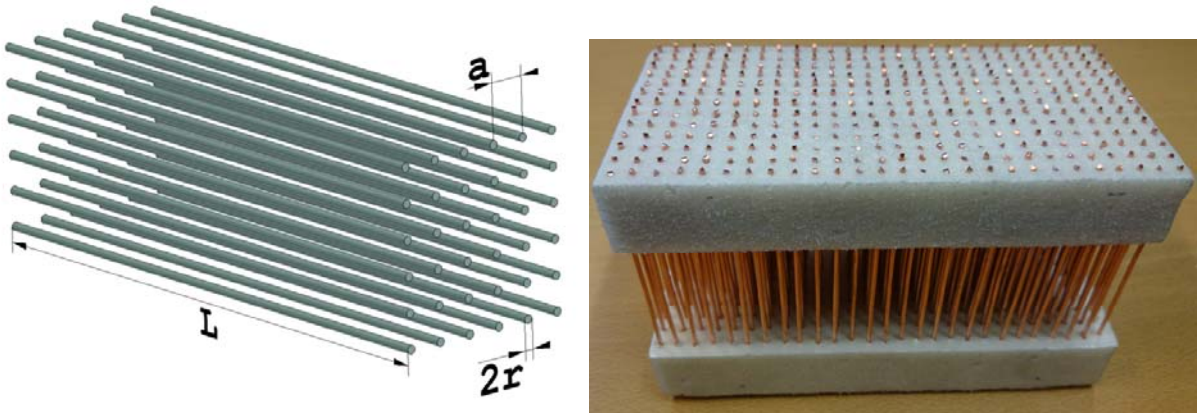
Метаматеріали є одним із найбільш перспективних класів матеріалів для розвитку сучасних пристроїв, таких як хвилеводи та антени, лінії передавання, поглиначі, рефлектори, сенсори, лінзи тощо [1–5]. У загальному метаматеріалами називають ефективно однорідні штучно створені матеріали із незвичайними ЕМ властивостями, що характеризується від'ємним значенням діелектричної та/або магнітної проникностей і представляють велику групу штучних ЕМ структур [6–8]. Одним із класів метаматеріалів є провідникові метаматеріали, що за фізичною структурою є оптично щільним масивом напрямлених металевих провідників, вмонтованих у діелектричну матрицю [9–11].

Структура із паралельних провідників (СПП) є одним із видів провідникових метаматеріалів, що складається із двох- або трирозмірної прямокутної решітки провідників і, для випадку дворозмірної СПП, є масивом паралельних металевих провідників довжиною $L$, діаметром $2r$ та періодом їх розташування $a$ (рис. 1) [11, 12].

СПП відома як пристрій для ефективного передавання енергії ЕМ хвиль на частотах Фабрі-Перо, довжина півхвилі якого приблизно відповідає довжині провідників структури [11–13]. Ця властивість застосовується для модифікування антен [14] та пристроїв передавання зображень у різних діапазонах частот [15-16], де можливість функціонування у широкій смузі частот була неможливою. Проте, у випадку поширення ЕМ хвиль у вузькій смузі частот джерело розміщувалось безпосередньо навпроти інтерфейсу СПП. Тому у роботах [17–19] було розглянуто можливість широкосмугового передавання енергії ЕМ хвиль, ідея якої полягала у вмонтуванні джерела ЕМ хвиль безпосередньо у СПП (безконтактно по відношенню до провідників), що забезпечило подавлення резонансів Фабрі-Перо, дало змогу розширити частотну смугу завдяки сильній близько-польовій взаємодії.

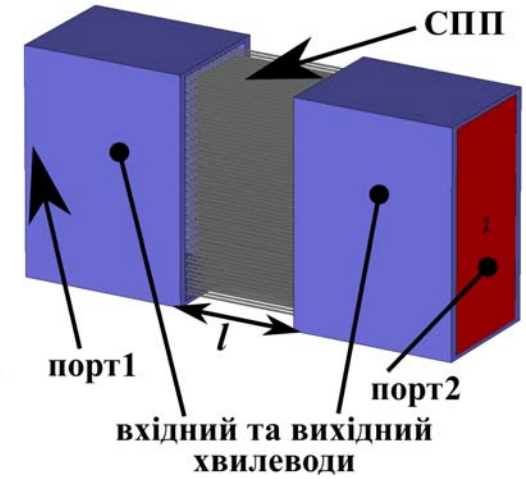
Модель досліджуваної у [17, 18] установки складається з двох прямокутних металевих хвилеводів (вхідного та вихідного) розмірами 164 на 82 мм, розділених повітряним проміжком $l$ = 90 мм (рис. 2). Розглянуто два випадки, коли повітряний проміжок між апертурами хвилеводів незаповнений та заповнений СПП. Сама ж СПП складається із 27×13 мідних провідників довжиною $L$ = 100 мм, радіусом $r$ = 0,75 мм та

періодом розташування $a$ = 6 мм. Для забезпечення режиму роботи у широкому діапазоні частот, СПП вмонтовано у кожну із апертур хвилеводів на глибину $d$ = 5 мм, що забезпечує близько-польову взаємодію СПП із джерелами ЕМ хвиль. Таким чином, можна здійснити порівняння ефективності зв'язку з та без використання СПП.




а) б)

**Рис. 1. Метаматеріал, що представляє собою структуру із паралельно розміщених провідників, довжиною *L*, діаметром 2*r* та періодом розташування провідників *a*: а – комп'ютерна та б – експериментальна моделі**




**Ошибка! Ошибка внедренного объекта.**

а) б)

**Рис. 2. Модель досліджуваної системи, що складається із двох хвилеводів, розділених повітряним проміжком, що заповнюється СПП: а) комп'ютерна та б) експериментальна моделі**

Усереднені значення частотних дисперсій функції передавання у діапазоні частот від 1 до 2 ГГц (одномодовий режим роботи хвилеводів із домінуючою $TE_{10}$ модою), отримані шляхом моделювання та експерименту у [17], показали покращення у 2-2,5 рази, а також приблизно у 4 рази – у діапазоні частот до 12 ГГц (багатомодовий режим роботи хвилеводів) за значенням коефіцієнта затухання сигналу в СПП.

Таким чином, **метою роботи є** вивчення процесу передавання гармонічних сигналів через СПП та їх спектральний аналіз.

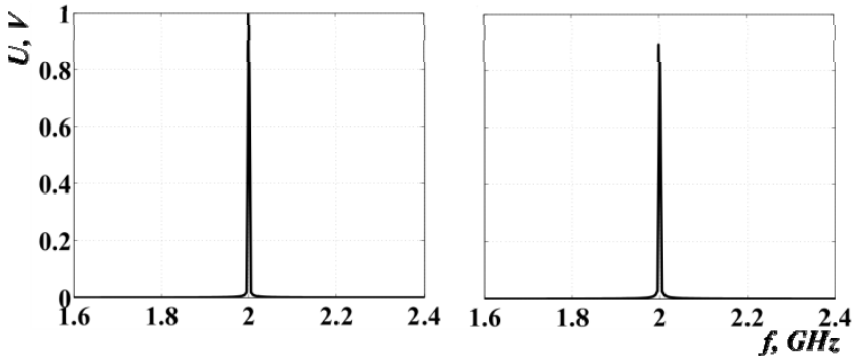
**Спектральний аналіз гармонічних сигналів, що передаються через СПП у широкому діапазоні частот**

Із описаних вище результатів можна зробити висновок тільки про можливість передавання енергії ЕМ хвиль у заданому діапазоні частот. Проте, не можна констатувати точно про структуру і спектр ЕМ хвилі, та відгук СПП на вхідний сигнал. З цією метою проведено моделювання та експериментальні дослідження, де широкосмугові сигнали були змінені на гармонічні із заданими значеннями частоти.

***Результати моделювання***

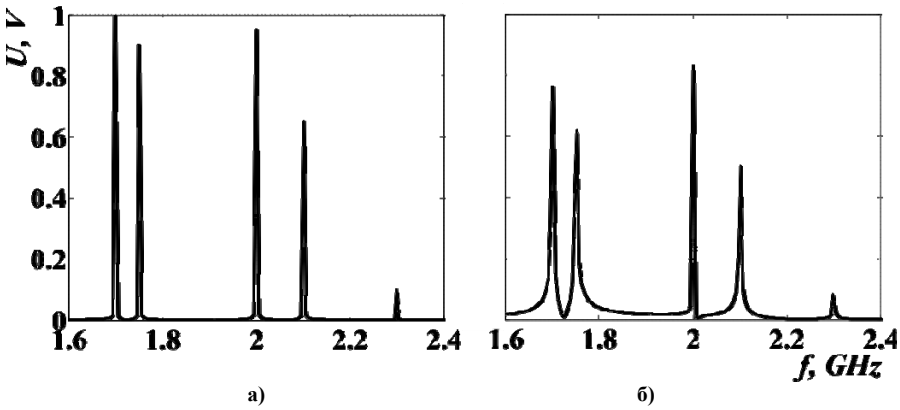
Результати моделювання виконувались з використанням моделі наведеної на рис. 2, а. Порт 1 використано як передавач, а порт 2 – як приймач. У першому дослідженні здійснювалось передавання синусоїдального сигналу із однією гармонікою. Для дослідження у даній роботі було вибрано частоту вхідного гармонічного сигналу 2 ГГц. Як видно із рис. 3, а та б, спектральні характеристики вхідного та вихідного сигналів містять тільки одну спектральну складову. Це підтверджує те, що СПП не призводить до нелінійних спотворень сигналів.

У наступному кроці моделювання було вибрано сигнал, що містить п'ять гармонічних складових на частотах 1,7; 1,75; 2; 2,1 та 2,3 ГГц. Як і було підтверджено попередніми моделюваннями, вихідні спектральні характеристики відповідають вхідним із частковим затуханням сигналу (рис. 4, а та б).




**а)** **б)**

**Рис. 3. Спектральні характеристики вхідного (а) та вихідного (б) гармонічних сигналів, що передаються через СПП, отримані шляхом комп'ютерного моделювання**



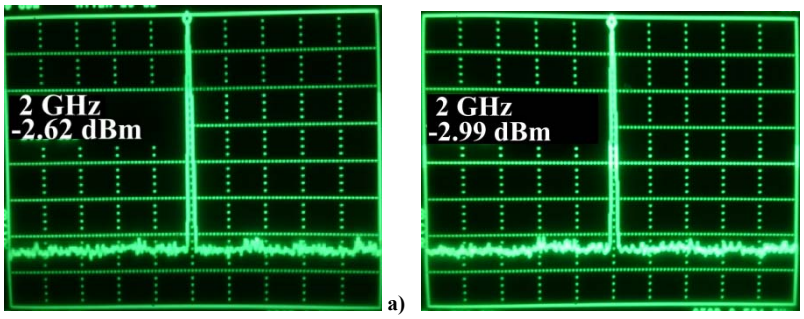

**а)** **б)**

**Рис. 4. Спектральні характеристики вхідного (а) та вихідного (б) сигналів із декількома гармонічними складовими, що передаються через СПП, отримані шляхом комп'ютерного моделювання**

Результати експерименту. Для експериментальних досліджень використовувалась установка, наведена на рис. 2, б. На відміну від досліджень у [17, 18] замість двопортового векторного аналізатора використовувався генератор сигналів, що підключався до порту вхідного хвилеводу, та аналізатор спектру, що підключався до порту вихідного хвилеводу. Дослідження було розділено на два етапи: а) із використанням закритої хвилевідної лінії, що дозволяє оцінити процеси передавання сигналів без втрат через випромінювання у вільний простір чи паразитних відбиваннях, наприклад від країв хвилеводів; б) через повітряний проміжок між двома хвилеводами з'єднаними за допомогою СПП як показано на рис. 2, а, що дозволяє розширити трактування отриманих у [17, 18] результатів для суми гармонічних сигналів.

Не зважаючи на те, що передавання ЕМ сигналів через закриту хвилевідну лінію зв'язку здійснюється практично без втрат і спотворень, необхідно дослідити вплив СПП на поширення хвиль, шляхом заповнення порожнини хвилеводу використовуваною СПП.

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено СПП, розміри та конструктивні елементи якої відповідали використаним для моделювання. СПП вмонтовувалася у закриту хвилевідну лінію так як на рис. 2, б, проте при значенні l = 0 мм.




**а)** **б)**

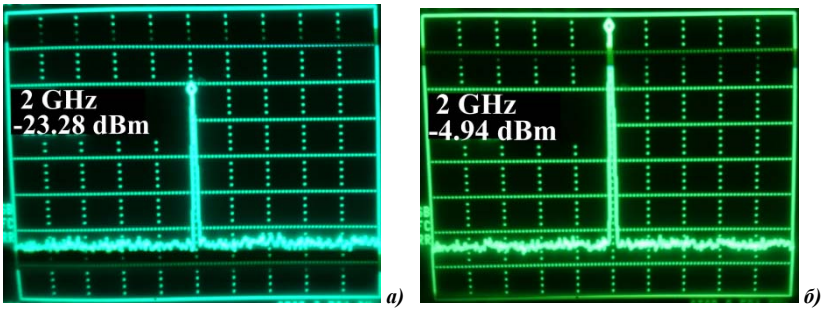
**Рис. 5. Спектральні характеристики гармонічних сигналів отриманих вхідним хвилеводом у випадку закритої хвилевідної лінії при: а) пустому хвилеводі та б) із використанням СПП, отриманих експериментальним шляхом**

У першому експериментальному дослідженні із генератора сигналів подавався синусоїдальний сигнал частотою 2 ГГц. Спектральна характеристика сигналу, що отримується вихідним хвилеводом без використання СПП, приведена на рис. 5, а. Видно, що потужність сигналу при проходженні через хвилевід спадає від 1 мВт (задана на генераторі потужність сигналу) до 0,55 мВт, що відповідає 0 та -2,62 дБм на

частоті 2 ГГц. У випадку використання СПП потужність прийнятого сигналу становить 0,50 мВт (-2,99 дБм), сигнал не містить ніяких додаткових спектральних складових (рис. 5, б), та майже не відрізняється від спектру на рис. 5, а. Це означає, що СПП є досить ефективною та сприятливою структурою для поширення ЕМ сигналів.

Для наступного експерименту було виготовлено металеву сітку з періодом гратки 10 мм (рис. 6), що вмонтовувалась у вхідний хвилевід безпосередньо навпроти інтерфейсу СПП на відстані 10 мм для того, щоб перетворити ЕМ хвилю, що поширюється у вхідному хвилеводі, у еванесцентну моду. У цьому випадку, використання СПП дозволяє покращити передавання гармонічного сигналу від 0,0047 мВт (-23,28 дБм) до 0,32 мВт (-4,94 дБм), що показано на рис. 7, а та б, відповідно. Це означає, що використання СПП дозволяє покращувати передавання затухаючих ЕМ сигналів.

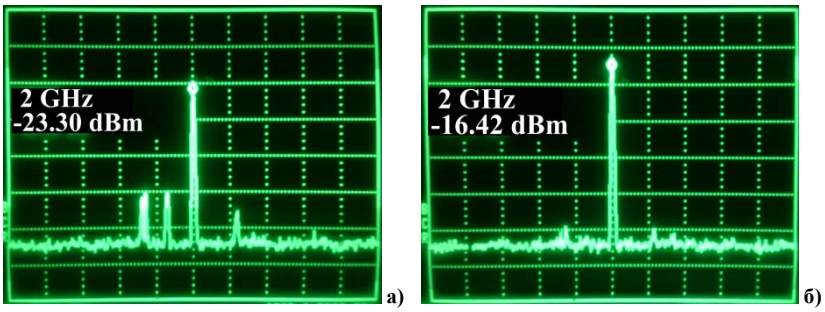
**Рис. 6. Металічна сітка із періодом розміщення провідників 10 мм вмонтована у вхідний хвилевід, щоб забезпечити затухання ЕМ хвиль**




*а)* *б)*

**Рис. 7. Спектральні характеристики гармонічних сигналів отриманих вихідним хвилеводом у випадку закритої хвилевідної лінії та із вмонтованою металевою сіткою у вхідний хвилевід: а) без та б) із використанням СПП, отриманих експериментальним шляхом**

Для дослідження процесу передавання гармонічних сигналів через повітряний проміжок, вхідний та вихідний хвилеводи розведено на відстань $l$ = 90 мм апертурами один до одного, як показано на рис. 2, б. Повітряний проміжок стає причиною розсіювання ЕМ хвиль, що відповідає низькому рівню потужності прийнятого сигналу на частоті 2 ГГц 0,0047 мВт (-23,3 дБм) та наявності додаткових спектральних складових на частотах 1,87; 1,93 та 2,12 ГГц, що зумовлено відбиванням від країв хвилеводів, а також інтерференцією хвиль (рис. 8, а).




**а)** **б)**

**Рис. 8. Спектральні характеристики гармонічних сигналів отриманих вхідним хвилеводом у випадку розміщення хвилеводів на відстані 90 мм один навпроти одного із вмонтованою металевою сіткою у вхідний хвилевід: а) без та б) із використанням СПП, отриманих експериментальним шляхом**

Використання СПП дозволяє покращити передавання гармонічного сигналу приблизно у 4,85 разів (-16.42 дБм), що відповідає отриманим у роботах [17], а також дозволяє уникнути додаткових паразитних спектральних складових через сильну близько-польову взаємодію метаструктури та хвилеводів (рис. 8, б).

**Висновки**

У роботі розглянуто СПП, що складається із паралельних металевих провідників (рис. 1), для розв'язання задачі передавання гармонічних сигналів на різних частотах. Експериментальна установка складалася із двох хвилеводів, розміщених один навпроти одного із повітряним проміжком між їх апертурами (рис. 2). Заповнюючи цей проміжок СПП, можна досягти покращення передавання ЕМ сигналів у 2-2,5 рази за значенням коефіцієнта затухання у широкому діапазоні частот [17, 18].

Для того, щоб вивчити вплив СПП на проходження ЕМ хвиль, досліджувана метаструктура була розміщена у порожнині закритої хвилевідної лінії зв'язку, що показало високу ефективність роботи структури. Дослідження використання СПП для передавання гармонічних сигналів через повітряний проміжок показало можливість її ефективного використання у випадку затухаючих та спотворених сигналів та було досягнуто покращення передавання гармонічних сигналів від -23,28 дБм до -4,94 дБм у закритій

хвилевідній лінії та від -23,3 дБм до -16,42 дБм – у випадку розміщення хвилеводів на відстані 90 мм один від одного.

Результати досліджень можуть бути корисними при розробленні ліній передавання на основі провідникових метаструктур для сигналів мікрохвильового діапазону частот як у вузькій, так і широкій смузі тощо.

**Література**

1. Zheludev N.I. From metamaterials to metadevices / N.I. Zheludev, Yu.S. Kivshar // Natural Materials. – 2012. – № 11. – P. 917–924.

2. Simovski C.R. Wire Metamaterials: Physics and Applications / C.R. Simovski, P.A. Belov, A.V. Atrashchenko, Yu.S. Kivshar // Advanced Materials. – 2012. – № 24. – P. 4229–4248.

3. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations ; edited by Engheta N. and Ziolkowski R. W. – Wiley–IEEE Press, 2006. – 414 p.

4. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты / В. Слюсар // Первая миля. – 2010. – № 3. – С. 44–60.

5. Вовчук Д.А. Покращення характеристик антен з використанням метаматеріалів (огляд) / Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 5(265). – С. 116–122.

6. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic / A. Sihvola // Physical Review Letters. – 2000. – Vol. 85. – № 18. – P. 3966–3069.

7. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ / В.Г. Веселаго // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92. – № 7. – С. 517–526.

8. Smith D.R. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith, W.J. Padill, D.C. Vier, S.C. Nemat–Nasser, S. Schultz // Physical Review Letters. – 2000. – № 84. – P. 4184–4187.

9. Rotman W. Plasma simulation by artificial and parallel plate media / W. Rotman // IRE Transactions on Antennas and Propagation. – 1962. – Vol. 10. – №1. – P. 82–95.

10. Mirmoosa M.S. Wire Media for Enhancement of Radiative Heat Transfer and Spontaneous Emission / M.S. Mirmoosa // PhD Thesis at Aalto University. – 2017.

11. Nefedov I. S. Wire media: Metamaterial Handbook. Theory and Phenomena of Metamaterials / I.S. Nefedov, A. J. Viitanen // Chapter 15–1. – CRC Press. – Boca Raton. – 2009.

12. Simovski C. R. Low–frequency spatial dispersion in wire media / C. R. Simovski, P. A. Belov // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 70. – P. 046616 (1–8).

13. Belov P. A. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals / P. A. Belov, C. R. Simovski, P. Ikonen // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 71. – P. 193105 (1–4).

14. Burghignoli P. Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire–Medium Slabs: Physical Mechanisms and Full-Wave Analysis / P. Burghignoli, G. Lovat, F. Capolino, D.R. Jackson, D.R. Wilton // Proceedings of XVI Riunione Nazionale di Elettromagnetismo, Genova. – 2006. – P. 113–116.

15. Belov P. Experimental study of the subwavelength imaging by a wire medium slab / P. Belov, Y. Zhao, S. Sudhakaran, A. Alomainy, Y. Hao // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 459–462.

16. Belov P. A. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range / P. A. Belov, Y. Zhao, S. Tse, P. Ikonen, M. G. Silveirinha, C. R. Simovski, S. A. Tretyakov, Y. Hao, C. Parini // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – P. 193108 (1–4).

17. Vovchuk D. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Media Slab / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // Progress in Electromagnetics Research. – 2015. – № 154. – P. 171–180.

18. Kosulnikov S. Broadband Power Transfer through a Metallic Wire Medium Slab / S. Kosulnikov, D. Vovchuk, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // Proceedings of URSI International Simposium on Electromagnetic Theory (EMTS). – 2016.

19. Vovchuk D. Unusual eigenmodes of wire-medium endoscopes: impact on transmission properties / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, C. Simovski // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – № 14. – P. 17988–18005.

**References**

1. Zheludev N.I. From metamaterials to metadevices / N.I. Zheludev, Yu.S. Kivshar // Natural Materials. – 2012. – № 11. – P. 917–924.

2. Simovski C.R. Wire Metamaterials: Physics and Applications / C.R. Simovski, P.A. Belov, A.V. Atrashchenko, Yu.S. Kivshar // Advanced Materials. – 2012. – № 24. – P. 4229–4248.

3. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations ; edited by Engheta N. and Ziolkowski R. W. – Wiley–IEEE Press, 2006. – 414 p.

4. Slyusar V. Metamaterialy v antennoj tehnike: osnovnye principy i rezultaty / V. Slyusar // Pervaya milya. – 2010. – № 3. – C. 44–60.

5. Vovchuk D.A. Pokrashchennia kharakterystyk anten z vykorystanniam metamaterialiv (ohliad) / D.A. Vovchuk, S.D. Haliuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ceriia: Tekhnichni nauky. – 2018. – № 5(265). – C. 116–122.

6. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic / A. Sihvola // Physical Review Letters. – 2000. – Vol. 85. – № 18. – P. 3966–3069.

7. Veselago V.G. Elektrodinamika veshestv s odnovremenno otricatelnymi znacheniyami e i m / V.G. Veselago // Uspehi fizicheskih nauk. – 1967. – T. 92. – № 7. – C. 517–526.

8. Smith D.R. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith, W.J. Padill, D.C. Vier, S.C. Nemat–Nasser, S. Schultz // Physical Review Letters. – 2000. – № 84. – P. 4184–4187.

9. Rotman W. Plasma simulation by artificial and parallel plate media / W. Rotman // IRE Transactions on Antennas and Propagation. – 1962. – Vol. 10. – №1. – P. 82–95.

10. Mirmoosa M.S. Wire Media for Enhancement of Radiative Heat Transfer and Spontaneous Emission / M.S. Mirmoosa // PhD Thesis at Aalto University. – 2017.

11. Nefedov I. S. Wire media: Metamaterial Handbook. Theory and Phenomena of Metamaterials / I.S. Nefedov, A. J. Viitanen // Chapter 15–1. – CRC Press. – Boca Raton. – 2009.

12. Simovski C. R. Low–frequency spatial dispersion in wire media / C. R. Simovski, P. A. Belov // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 70. – P. 046616 (1–8).

13. Belov P. A. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals / P. A. Belov, C. R. Simovski, P. Ikonen // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 71. – P. 193105 (1–4).

14. Burghignoli P. Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire–Medium Slabs: Physical Mechanisms and Full-Wave Analysis / P. Burghignoli, G. Lovat, F. Capolino, D.R. Jackson, D.R. Wilton // Proceedings of XVI Riunione Nazionale di Elettromagnetismo, Genova. – 2006. – P. 113–116.

15. Belov P. Experimental study of the subwavelength imaging by a wire medium slab / P. Belov, Y. Zhao, S. Sudhakaran, A. Alomainy, Y. Hao // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 459–462.

16. Belov P. A. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range / P. A. Belov, Y. Zhao, S. Tse, P. Ikonen, M. G. Silveirinha, C. R. Simovski, S. A. Tretyakov, Y. Hao, C. Parini // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – P. 193108 (1–4).

17. Vovchuk D. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Media Slab / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // Progress in Electromagnetics Research. – 2015. – № 154. – P. 171–180.

18. Kosulnikov S. Broadband Power Transfer through a Metallic Wire Medium Slab / S. Kosulnikov, D. Vovchuk, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // Proceedings of URSI International Simposium on Electromagnetic Theory (EMTS). – 2016.

19. Vovchuk D. Unusual eigenmodes of wire-medium endoscopes: impact on transmission properties / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, C. Simovski // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – № 14. – P. 17988–18005.

Рецензія/Peer review : 8.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-147-153
УДК 621.396.963

В.Р. ЛЮБЧИК, О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ, О.С. ЯНОВИЦЬКИЙ
Хмельницький національний університет

# РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО МЕТОДУ ПРИДУШЕННЯ СИГНАЛУ ЗАПИТУ БОКОВИМИ ПЕЛЮСТКАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

*Розглядається покращення відомого методу придушення сигналу запиту від бічних пелюсток в літакових відповідачах, в якому використовується аналогова схема амплітудного порівняння на транзисторах з ємністю пам'яті в колі емітера, з допомогою чого формується двоступінчатий рівень придушення. Недоліком такого методу є нестабільність рівня порогу придушення сигналу, яка залежить від нестабільності величини ємності пам'яті і зміни опору напівпровідникових ключів при зміні температури зовнішнього середовища від -60 °С до +60 °С, що призводить до похибок при придушенні сигналу запиту. В статті розглядається цифровий метод придушення запиту боковими пелюстками, розроблена віртуальна модель (в підпрограмі MatLAB – Simulink) функціонування пристрою, за допомогою якої перевірено працездатність цифрової схеми в масштабах реального часу і доведено, що за допомогою цього методу виключається залежність величини порогу придушення від температури, а також це дає змогу збільшити на 20% зону впевненого прийому сигналу запиту літаковим відповідачем.*

*Ключові слова: триімпульсне придушення, аналого-цифрове перетворення, АЦП, віртуальна модель, Simulink, літаковий відповідач.*

V.R. LUBCHIK, A.K. YANOVITSKYI, A.S. YANOVITSKYI
Khmelnytskyi National University

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE DIGITAL METHOD OF SUPPRESSING THE REQUEST SIGNAL BY LATERAL PETALS OF RADAR AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

*The improvement of the known method of suppressing the request signal from the side petals in the aircraft responders, which uses an analogue scheme of amplitude comparison on transistors with memory capacity in the circle of the emitter, thereby forming a two-stage suppression level by memorizing the voltage of the input signal on the capacitance and comparing it with voltage signal from all directional antenna. The disadvantage of this method is the instability of the signal threshold threshold, which depends on the instability of the memory capacity when the ambient temperature changes from -60 ° C to +60 ° C and the resistance of the semiconductor keys, which leads to errors in suppressing the request signals. The article deals with the digital method of suppressing the request by lateral petals, developed a virtual model (in the MatLAB - Simulink subroutine) the functioning of the device by which the operation of the digital circuit in real-time scales was checked and it was proved that with this method the dependence of the value of the threshold of suppression on temperature is excluded, and It also enables the air traffic control system to increase by 20% the zone of confident reception of the request signal by the aircraft respondent. In addition, the proposed digital method of suppressing query signals by side lobes allows you to create more reliable and easy to design such devices.*

***Key words:*** *three-pulse suppression, analogue-to-digital conversion, ADC, virtual model, Simulink,* aircraft responder.

**Вступ.** У зв'язку зі зростаючою щільністю руху повітряних суден, а також застосуванням автоматизованих систем керування повітряним рухом (КПР) набуває актуальності питання зниження вірогідності помилкового запиту літакових відповідачів (ЛВ).

В сучасних системах КПР придушення помилкового запиту здійснюється завдяки спільній роботі як наземних, так і бортових систем [1].

Відомо, що діаграма спрямованості антени РЛС в горизонтальній площині має бічні пелюстки [2]. Але не зважаючи на те, що вони мають меншу потужність випромінювання, ЛВ може приймати сигнал і від бічних пелюсток. Як результат – видавати сигнал-відповідь. Така поведінка систем створює складнощі в ідентифікації робочої ситуації на екрані РЛС.

Для придушення запиту від бічних пелюсток використовується відмінність енергетичних рівнів випромінювання головних і бічних пелюсток наземних РЛС.

До двох імпульсів коду запиту Р1 і Р3 (див. рис. 1) випромінюваних направленою антеною, додається третій імпульс Р2 (імпульс придушення), що випромінюється окремою всебічно направленою антеною (антеною придушення). Таким чином, у просторі виникає наступна ситуація. Якщо літальний об'єкт спрямований на головну пелюстку, тоді третій імпульс Р2 значно менший, що указує на нормальну умову. При отриманні сигналу від бічної пелюстки, рівні сигналів Р1, Р3 порівнянні з Р2, а отже сигнал є помилковим і підлягає придушенню.

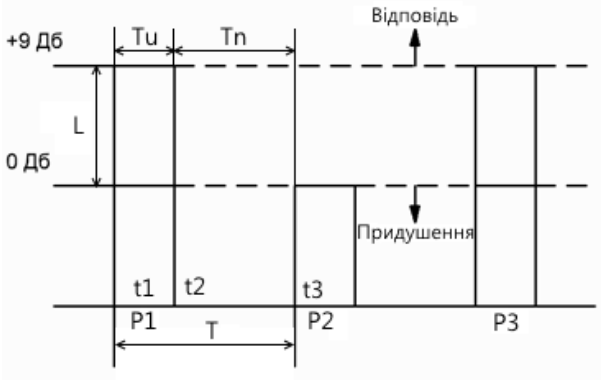



**Рис. 1. Принцип передачі триімпульсного сигналу**

Слід зазначити, що зона дії системи КПР розділена енергетичним рівнем сигналу придушення на

зону потенційної можливості помилкового запиту, тобто зону в якій можливий помилковий запит, і зону відсутності помилкового запиту – зону упевненого запиту. Оскільки енергетичний рівень сигналу придушення підбирається свідомо вище рівня сигналів випромінюваних бічними пелюстками, важливо здійснити правильний його вибір, що неможливо без аналізу точнісних характеристик пристрою придушення відповідачів.

У пристроях придушення сучасних ЛВ використовується схема двоступінчастого рівня придушення [3].

Імпульс придушення за часом відстає на 2±0,15 мкс від первинного імпульсу коду запиту. У ЛВ проводиться порівняння амплітуд імпульсів коди Р1, Р3 і імпульсу придушення Р2. Відповідь відбувається тільки тоді, коли рівень Р1, Р3 більше Р2 (рівня придушення).

Відомий метод придушення, який використовує двоступінчастий рівень запиту від бічних пелюсток [4], схема реалізації якого приведена на рис. 2 в якому використовується схема амплітудного порівняння на транзисторах з накопичувальною ємністю пам'яті в колі емітера.

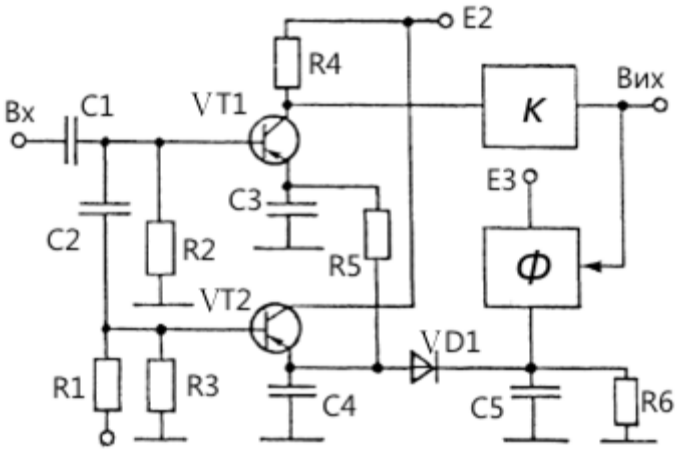



**Рис. 2. Схема аналогового двоступінчастого рівня придушення**

Електрична схема, що пояснює принцип роботи пристрою триімпульсного придушення, використовуючи двоступінчастий рівень, наведена на рис. 2.

Схема містить вхідне коло з дільником на R1, R3; елемент порівняння на VT1; елемент аналогової пам'яті на VT2, C4; формувач імпульсів Ф; ключ К з накопичувальною ємністю С5 і ланцюг розряду VD1.

Схема працює таким чином. З приходом імпульсу Р1 ємність С3 елементу порівняння заряджає до його амплітудного значення, ємкість С5 елементу аналогової пам'яті – до рівня придушення. Накопичувальна ємкість С5 заряджає до напруги джерела Е3 через ключ К, який замкнутий під час дії вихідного імпульсу формувача Ф.

Після проходження імпульсу Р1 коду запиту напруга на ємності С3 знижується до рівня придушення на ємності С5 і залишається незмінною до приходу імпульсу придушення Р2.

Після амплітудного порівняння імпульсу придушення Р2 напруга на накопичувальній ємності С5 знижується до рівня придушення, відкривається діод VD1 і напруга на ємностях С3, С4, С5 знижується по експоненті до нуля.

Недоліком такого пристрою є залежність зміни величин конденсаторів які виконують роль запам'ятовуючих рівнів порогу придушення від зміни температури навколишнього середовища (-60С - +60С), а також зміни опору ключів, які виконані на транзисторах приводить до значної похибки подавлення і погіршення зони упевненого прийому запитів на 20% [4].

**Основна частина.** В основу поставлена задача покращити точність подавлення запиту боковими пелюстками, зменшити зміни величин рівня порогу придушення від впливу зовнішньої температури, підвищити надійність шляхом заміни аналогового принципу будови пристрою на цифровий [5].

На рис. 3 зображена функціональна схема цифрового пристрою придушення запиту боковими пелюстками антени системи КПР.

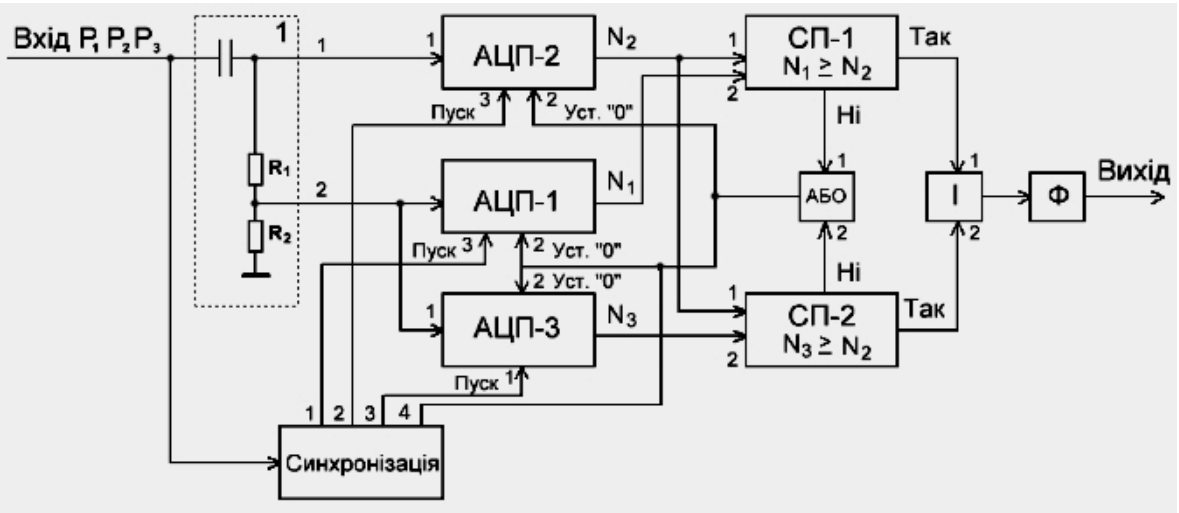



**Рис. 3. Функціональна схема цифрового пристрою придушення запиту боковими пелюстками антени системи КПР**

Цифровий пристрій придушення запиту боковими пелюстками антени системи КПР містить шину входу – Вхід; резистивний подільник – 1; другий АЦП – АЦП-2; перший АЦП – АЦП-1; третій АЦП – АЦП-3; першу схему порівняння – СП-1; другу схему порівняння – СП-2; схему співпадіння – І; формувач вихідного сигналу – Ф; вихідну шину – Вихід; схему логічного порівняння – АБО; синхронізатор – Синхронізація.

Пристрій працює наступним чином. По шині входу „Вхід" поступають з підсилювача логаритмічною амплітудною характеристикою імпульси $P_1$, $P_2$, $P_3$ які випромінюються наземною радіолокаційною станцією. До двох імпульсів коду запиту $P_1$ і $P_2$ (рис. 3) випромінюваних направленою антеною додається третій імпульс $P_3$ (імпульс придушення), що випромінюється окремою всенаправленою антеною (антеною придушення).

Якщо повітряне судно спрямовано на головну пелюстку, тоді імпульс $P_2$ значно менший від $P_1$ і $P_3$ на 9 Дб, що указує на нормальну умову.

При отриманні сигналу від бічної пелюстки, рівні сигналів $P_1$ та $P_3$ в порівнянні з $P_2$, різниця становить менше 9 Дб, ці сигнали є помилковими і придушуються.

При появі на вході резистивного подільника імпульсу $P_1$ він поступає на вхід синхронізатора „Синхронізація" з виходу 1 з якого подається сигналу «Пуск» на вхід 3 першого АЦП-1, на вхід якого поступає сигнал $P_1$, з 2 виходу резистивного подільника 1, при чому амплітуда сигналу $P_1$ зменшена резистивним подільником на 9 Дб, перший АЦП-1 фіксує цифрове значення амплітуди вхідного сигналу N1.

При появі на шині входу „Вхід" імпульс $P_2$ який поступає через резистивний подільник 1 з виходу 1 на 1 вхід другого АЦП-2, з синхронізатора „Синхронізація" в момент появи на його вході імпульсу $P_2$ з 2 виходу поступає сигнал «Пуск» на 3 вхід другого АЦП-2, який фіксує цифрове значення амплітуди вхідного сигналу $N_2$. При появі на шині входу "Вхід" імпульсу $P_3$ він поступає на вхід синхронізатора „Синхронізація" з виходу 3 подається сигнал «Пуск» на 3 вхід третього АЦП-3 на вхід якого поступає сигнал $P_3$ з 2 виходу резистивного подільника 1, амплітуда якого зменшена на 9 Дб, третій АЦП-3 фіксує цифрове значення амплітуди вхідного сигналу $N_3$.

З виходу АЦП-2 поступає цифрове значення $N_2$ на вхід 1 першої і другої схем порівняння СП-1, СП-2. З виходу АЦП-1 поступає цифрове значення $N_1$ на другий вхід першої схеми порівняння СП-1. В першій схемі порівняння СП-1 фіксується виконання умови $N_1 \geq N_2$, видається сигнал «Так» на 1 вхід схеми співпадіння „І", це відповідає умові, що амплітуда імпульсу $P_1$ більша рівня +9 Дб від амплітуди імпульсу подавлення $P_2$.

Аналогічно проходить аналіз виконання умови порівняння величини амплітуди сигналу $P_2$ і сигналу $P_3$ з допомогою другої схеми порівняння СП-2.

При виконанні умови $N_3 \geq N_2$ з виходу «Так» другої схеми порівняння СП-2 поступає сигнал на 2 вхід схеми співпадіння „І".

При наявності на 1 і 2 входах схеми співпадіння „І" сигналу «Так», схема співпадіння „І" видає сигнал на формувач „Ф", який формує вихідний сигнал на шину виходу „Вихід" пристрою для формування відповіді літакового відповідача.

В разі не виконання умови $N_1 \geq N_2$ або $N_3 \geq N_2$ схеми порівняння СП-1 і СП-2 видають сигнал «Ні», який через схему логічного порівняння «АБО» призупиняють роботу АЦП-2, 1, 3 які переходять в «0» стан і вихідний сигнал не подається.

При завершенні циклу виміру з 4 виходу синхронізатора „Синхронізація" подається сигнал «Уст. 0» на вхід 2 АЦП-2, 1, 3, що приводить пристрій в стан готовності до наступного циклу визначення сигналу запиту. Такии чином метод реалізує наступну логічну функцію:

$$\left.\begin{array}{l} N_1 \gtrless N_2 \longrightarrow X_1 \\ N_2 \lessgtr N_3 \longrightarrow X_2 \end{array}\right\} \Longrightarrow X_1 \gtrless X_2 \longrightarrow Y \begin{array}{l} \text{1 - вірно} \\ \text{0 - не вірно} \end{array}$$

**Віртуальна модель.** Було створено віртуальну модель пристрою для дослідження точнісних та імовірних характеристик за допомогою підпрограми MatLab – Simulink [6].

На рис. 5 зображено блок схему алгоритму роботи віртуальної моделі пристрою.

На рис. 6 зображено віртуальну модель, а на рис. 7 зображено імпульси на осцилографі Scope.

Створена віртуальна модель працює наступним чином.

Перший, другий і третій імпульси генеруються генераторами імпульсу (Pulse Generator, Pulse Generator1, Pulse Generator2) з довільними параметрами для кожного відповідно (рис. 4 п. 1, рис. 6, 7).

Перший імпульс поступає на вхід синхронізатора (Switch Case), з виходу 1 (Case 1) подається на (Triggered Subsystem) (рис. 4 п. 2, рис. 6, 7).

Другий імпульс поступає на вхід синхронізатора (Switch Case), з виходу 2 (Case 2) подається на вхід другого АЦП (Idealized ADC quantizer1), після чого значення запам'ятовує другий тригерний пристрій (Triggered Subsystem1) (рис. 4 п.3, рис. 6, 7).

Третій імпульс поступає на вхід синхронізатора (Switch Case), з виходу 3 (Case 3) подається на вхід третього АЦП (Idealized ADC quantizer2), після чого значення запам'ятовує третій тригерний пристрій (Triggered Subsystem2) (рис. 4 п. 4, рис. 6, 7).

Цифрове значення першого імпульсу, яке запам'ятав перший тригерний пристрій (Triggered Subsystem) зменшується на 9дб шляхом ділення на константу 2.82 (прораховано у разах) першим

оператором ділення (Divide) і порівнюється шляхом віднімання першим оператором віднімання (Subtract) з цифровим значенням третього імпульсу, яке запам'ятав третій тригерний пристрій (Triggered Subsystem2) (рис. 4 п. 5, рис. 6, 7).

Цифрове значення третього імпульсу, яке запам'ятав третій тригерний пристрій (Triggered Subsystem2) зменшується на 9 Дб шляхом ділення на константу 2.82 (прораховано у разах) другим оператором ділення (Divide1) і порівнюється шляхом віднімання другим оператором віднімання (Subtract1) з цифровим значенням другого імпульсу, яке запам'ятав другий тригерний пристрій (Triggered Subsystem1) (рис. 4 п. 6, рис. 6, 7).

Цифрове значення у результаті порівняння першого і третього імпульсів першим оператором віднімання (Subtract) перевіряється на рівність нулю (>=0) першим оператором порівняння з нулем (Compare to Zero), після чого перевірене значення оброблюється першим логічним оператором (XOR Logical Operator), якщо значення більше або рівне нулю, то перший логічний оператор (XOR Logical Operator) пропускає сигнал на вихід, якщо ні — робота схеми блокується (рис. 4 п. 7, рис. 6, 7).

Цифрове значення у результаті порівняння другого і третього імпульсів другим оператором віднімання (Subtract1) перевіряється на рівність нулю (>=0) другим оператором порівняння з нулем (Compare to Zero1), після чого перевірене значення оброблюється другим логічним оператором (XOR Logical Operator1), якщо значення більше або рівне нулю, то другий логічний оператор (XOR Logical Operator1) пропускає сигнал на вихід, якщо ні — робота схеми блокується (рис. 4 п. 7, рис. 6, 7).

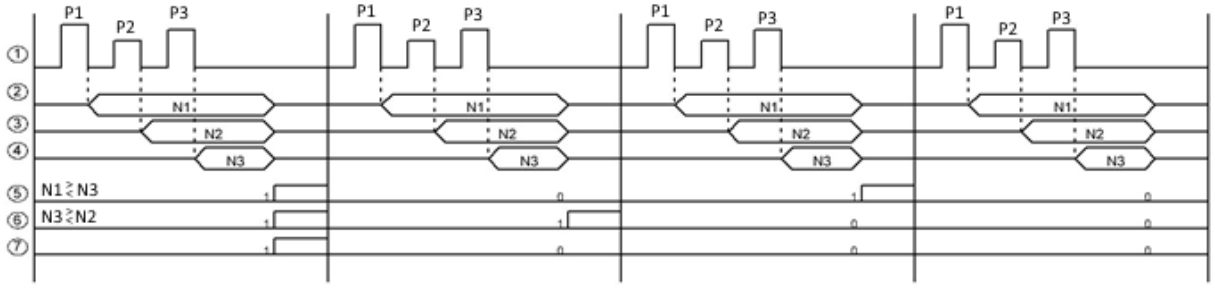



**Рис. 4. Синхронізація імпульсів**

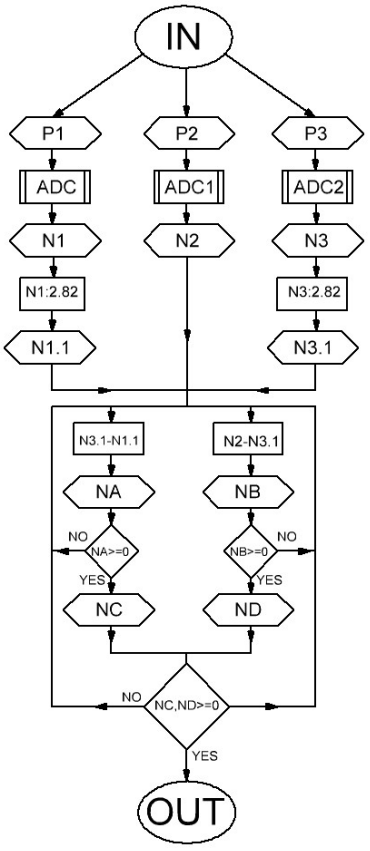



**Рис. 5. Блок схема алгоритму роботи віртуальної моделі пристрою**

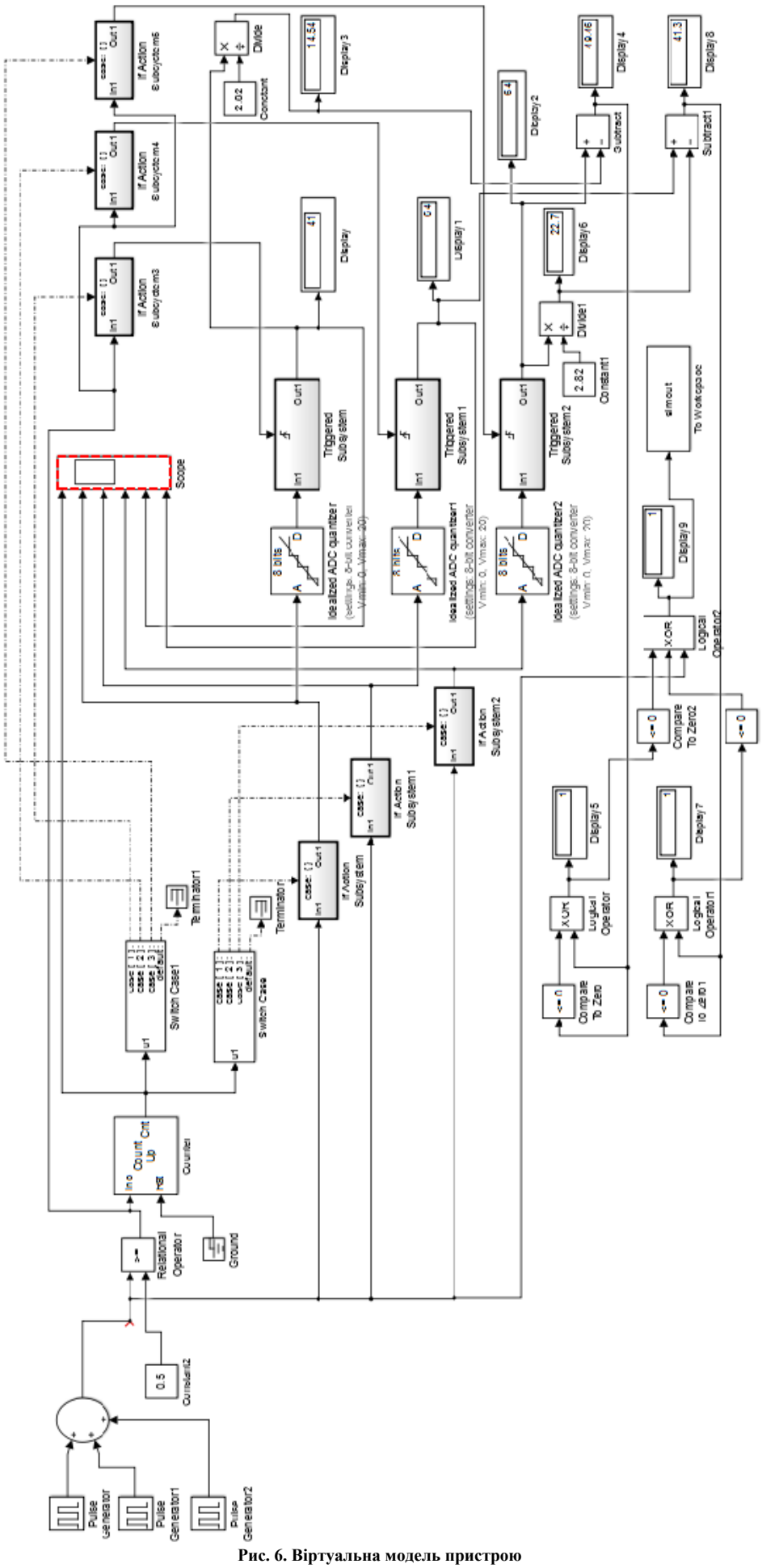



**Рис. 6. Віртуальна модель пристрою**

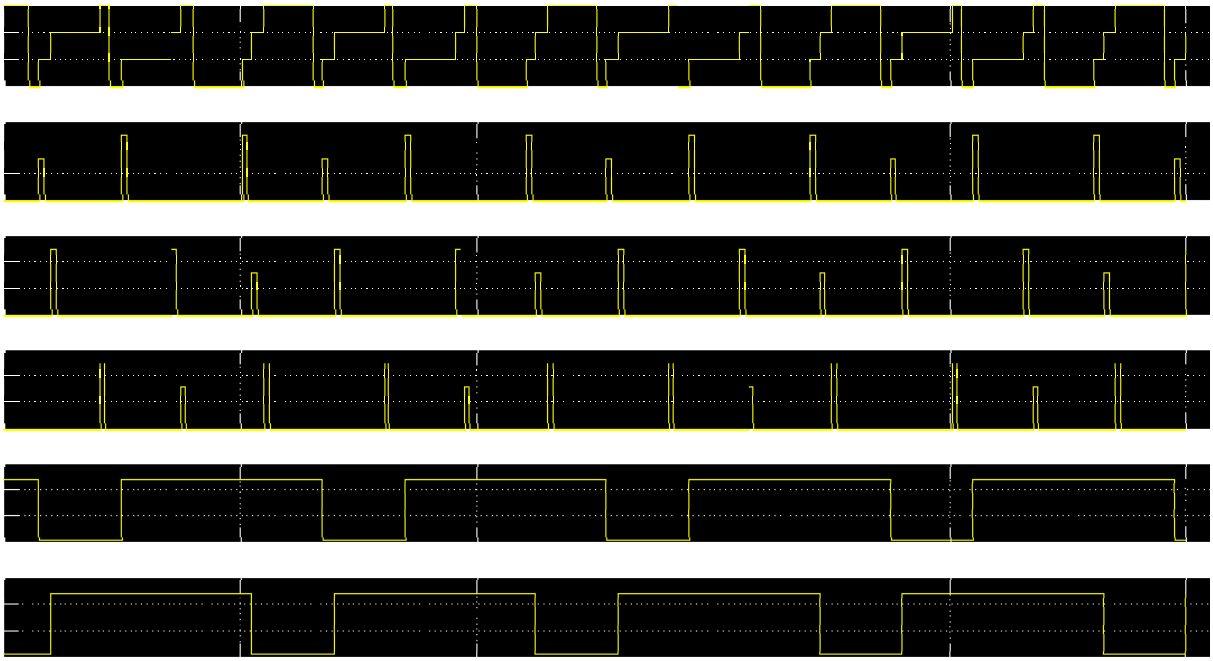


**Рис. 7. Зображення імпульсів на осцилографі Scope**

Використовуючи основне рівняння активної радіолокації [7], при активній відповіді дальність D до відповідача визначається виразом:

$$D = \sqrt{\frac{P_{вип} \cdot G_{вип} \cdot G_{пр} \cdot \lambda_з^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{пр}}} \quad (1)$$

де Рвип – потужність передавача опитування; Gвип , Gпр – коефіцієнти спрямованості антен передавача приймача каналу запиту; чутливості відповідача; λз – довжина хвилі. Тоді відносна зміна зони упевненого запиту рівна:

$$\frac{D_м}{D_н} = \frac{\sqrt{\frac{P_{вип.м} \cdot G_{вип} \cdot G_{пр} \cdot \lambda_з^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{пр}}}}{\sqrt{\frac{P_{вип.н} \cdot G_{вип} \cdot G_{пр} \cdot \lambda_з^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{пр}}}} = \frac{\sqrt{P_{вип.м}}}{\sqrt{P_{вип.н}}} \quad (2)$$

де Dн , Рвип.н – номінальне значення потужності передавача опитування і дальності прийому сигналу придушення; Dм, Рвип.м – максимальне значення потужності передавача опитування і дальності прийому сигналу придушення (з урахуванням збільшення рівня придушення відповідача).

$$10\lg\frac{P_{вип.м}}{P_{вип.н}} = \Delta L = 1{,}58 \text{ дБ, та } P_{вип.м} = 1{,}44 \cdot P_{вип.н} \quad (3)$$

де $\Delta L$ – величина відхилення порогу придушення від впливу зовнішніх факторів, складає 1,58 Дб.
Отже зменшення зони певного запиту згідно з урахуванням виразів (2,3) складає:

$$\Delta D = D_м - D_н = D_н \cdot \frac{\sqrt{P_{вип.м}} - \sqrt{P_{вип.н}}}{\sqrt{P_{вип.н}}} = 0{,}2 \cdot D_н . \quad (4)$$

Так як, враховуючи те, що в цифровому методі відхилення порогового значення придушення буде визначатись величиною молодшого розряду АЦП, що практично буде відповідати значенню на 2 порядки менше ніж в аналогових методах, то збільшення зони впевненого прийому запиту буде максимальним і на 20% збільшиться.

**Висновки.** В результаті застосування цифрового методу придушення сигналу запиту боковими пелюстками радіолокаційних систем керування повітряним рухом досягнута задача збільшення зони впевненого прийому сигналів запиту на 20% при впливі зміни температури від -60 °С до +60 °С, а також досягнуто підвищення надійності і спрощення конструкції.

В подальшому розроблена модель цифрового пристрою дасть змогу досліджувати характеристики ЛВ сумісно з логарифмічним підсилювачем вхідних сигналів, а також досліджувати характеристики цифрового пристрою при зміні вхідних сигналів в залежності від діаграми направленості антени РЛС в реальному масштабі часу.

**Література**

1. Яновський Ф.Й. Радіолокаційні системи повітряних суден : підруч. / Ф. Й. Яновський. — К. : НАУ, 2012. — 688 с.

2. Лавров А. С. Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. – М. : Советское радио, 1974. – 368 с.

3. Авторское свидетельство № 682015. Устройство для подавления запросов боковыми лепестками систем УВД / Жиган Н.И., А.К. Яновицкий, Н.А. Харкевич. – БИ, СССР, 1979.

4. Яновицький С.О. Підвищення ефективності бортової радіолокаційної системи керування повітряним рухом / С.О. Яновицький, В.М. Кичак, К.Л. Горященко // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 1.

5. Позитивне рішення патента на корисну модель (форма В8 від 06.05.19). Заявка № u 2019 01027 від 31.01.19. Пристрій придушення запиту боковими пелюстками антени системи керування повітряним рухом / Любчик В.Р., Яновицький О.К., Яновицький О.С.

6. Коржик М.В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. − Київ : НТУУ "КПІ", 2016. − 174 с. : іл.

7. Коростелев А. А. Теоретические основы радиолокации : учебное пособие для вузов / А.А. Коростелев и др. ; под ред. Дулевича. – М. : Советское радио, 1978. – 608 с.

**References**

1. Ianovskyi F.I. Radiolokatsiini systemy povitrianykh suden : pidruch. / F. Y. Yanovskyi. — K. : NAU, 2012. — 688 s.

2. Lavrov A. S. Antenno-fidernye ustrojstva / A. S. Lavrov, G. B. Reznikov. – M. : Sovetskoe radio, 1974. – 368 s.

3. Avtorskoe svidetelstvo № 682015. Ustrojstvo dlya podavleniya zaprosov bokovymi lepestkami sistem UVD / Zhigan N.I., A.K. Yanovickij, N.A. Harkevich. – BI, SSSR, 1979.

4. Ianovytskyi S.O. Pidvyshchennia efektyvnosti bortovoi radiolokatsiinoi systemy keruvannia povitrianym rukhom / S.O. Yanovytskyi, V.M. Kychak, K.L. Horiashchenko // Naukovi pratsi VNTU. – 2011. – № 1.

5. Pozytyvne rishennia patenta na korysnu model (forma V8 vid 06.05.19). Zaiavka № u 2019 01027 vid 31.01.19. Prystrii prydushennia zapytu bokovymy peliustkamy anteny systemy keruvannia povitrianym rukhom / Liubchyk V.R., Yanovytskyi O.K., Yanovytskyi O.S.

6. Korzhyk M.V. Modeliuvannia obiektiv ta system keruvannia zasobamy MatLab : navch. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl. / M. V. Korzhyk. − Kyiv : NTUU "KPI", 2016. − 174 s. : il.

7. Korostelev A. A. Teoreticheskie osnovy radiolokacii : uchebnoe posobie dlya vuzov / A.A. Korostelev i dr. ; pod red. Dulevicha. – M. : Sovetskoe radio, 1978. – 608 s.

Рецензія/Peer review : 2.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-154-157
УДК 621.398

О.С. ПИВОВАР, Я.В. ВЕРЖБИЦЬКИЙ
Хмельницький національний університет

# МЕТОД НЕЛІНІЙНОЇ РЕАКЦІЇ У СЕГМЕНТОВАНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ДІАГНОСТИЧНИХ ТА ОХОРОННИХ СИСТЕМ

*Розглянута можливість застосування нелінійних елементів для контролю ушкоджень сегментованих слабострумових кабельних ліній в охоронних системах. Запропоновано метод нелінійної реакції на основі використання стабілітронів встановлених між сегментами контрольованої лінії передачі та вимірювання напруги на вході лінії.*

*Ключові слова: кабельна система, лінія передачі, нелінійний елемент, стабілітрон, вольтметр.*

OLEG SERGHIJOVYCH PYVOVAR, JAROSLAV VIKTOROVYCH VERZHBYCJKYJ
Khmelnytskyi National University

## NONLINEAR REACTION METHOD IN SEGMENTED CABLE LINES OF DIAGNOSTIC AND SECURITY SYSTEMS

*The use of cable systems is not limited to application within the fields of energy and telecommunications. Wired transmission lines are successfully used in various fields: fire alarm systems, security systems aimed to safeguard objects against unauthorized access, military systems, technological systems, etc. In 80% of cases, the cause of unstable operation or emergency situations of transmission of signals is damage to the cable network. In the context of a global terrorist threat and local military action, the development of new methods of automated technical protection of objects against unauthorized access remains an urgent task. Line control systems can also be used as alarm systems. To lower the cost of the system, the line itself often serves as both a sensor and as an environment for delivering secured information. It is expedient to use the wired perimeter security systems to protect especially important objects by installing the systems in front of the main fence to prevent possible unauthorized entry into the site. Requirements for methods of localization of damage within a cable systems have been developed for application in such systems. According to the requirements, the classification of methods for automatic measurement of damage distances in low-voltage homogeneous transmission lines and promising methods for application in security systems according to criteria of minimization of hardware costs and costs are specified. The method of nonlinear reaction is developed, consisting in measuring the voltage at the inlet of a segmented cable line, which is powered by a direct current with nonlinear elements with a voltage-type characteristic of the limiter installed at the segment junctions. The structural scheme and diagram of the control system for breakage and short circuit breakdowns based on the use of stabilizers as nonlinear elements have been developed. The advantages and disadvantages of using the method of nonlinear reaction in perimeter security systems are indicated, the possibility of simple implementation of the method and variants of its improvement are indicated.*

*Key words: cable system, transmission line, nonlinear element, Zener diode, voltmeter.*

### Постановка проблеми

Без використання кабельних мереж неможливо уявити собі існування сучасної цивілізації. Базовим елементом будь-якої кабельної телекомунікаційної мережі є середовище поширення сигналів. У 80 % випадків причиною нестабільної роботи або аварійних ситуацій передачі сигналів є проблеми, що виникають у кабельній системі (КС). Сучасна КС має забезпечувати роботу будь-яких типів телекомунікаційних й інформаційних систем і мереж протягом десятків років. Використання КС не обмежується тільки застосуванням у галузі енергетики та телекомунікацій, кабельні системи із успіхом застосовуються в охоронних та сенсорних системах, системах контролю та керування, технологічних та телеметричних системах тощо [1].

Лінії передачі КС можуть виконувати декілька додаткових функцій щодо основного призначення. Наприклад, в охоронних системах кабель може бути використано як сповіщувачі і середовище передачі телеметричних повідомлень та сигналів керування. Найчастіше КС використовують в системах охорони периметрів. Системи охоронної сигналізації периметрів доцільно використовувати для охорони особливо важливих об'єктів шляхом встановлення їх перед основною огорожею для попередження можливого несанкціонованого територію об’єкту. В умовах глобальної терористичної загрози та локальних військових дій розробка нових методів та способів автоматизованого технічного захисту об’єктів від несанкціонованого доступу є і залишається актуальним завданням.

**Метою статті** розробка та оптимізація методу нелінійної реакції для застосування в системі контролю критичних ушкоджень сегментованих кабельних ліній та охоронних систем мінімізованої вартості та простоти.

### Аналіз останніх джерел

Системи контролю лінії та стану оточуючого середовища можуть використовуватись як комплексна система сигналізації [1]. Сама лінія для забезпечення низької вартості часто виступає і в якості сенсора, і в якості середовища доставки охоронної інформації. На даний час розроблена велика кількість типів сповіщувачів: радіопроменеві та радіохвильові, вібраційні та вібросейсмічні, індуктивні та ємнісні, оптичні та оптико-електронні тощо. Тактика оснащення об'єктів системами охоронної кабельної сигналізації периметрів часто застосовується для охорони важливих об’єктів як приватної так і державної власності. Вибір конкретних типів периметральних систем та методів охоронної сигналізації проводиться залежно від наявності механічного огородження, смуги відчуження та її ширини, довжини периметра охорони, рельєфу місцевості тощо [2]. Система сигналізації ушкодження апаратури охорони має передбачати індикаторну систему виявлення місця несанкціонованого пошкодження зі світловою та звуковою індикацією точки

однозначного впливу [2].

Найбільш простими, дешевими та історично першими системами охорони на основі КС є проводово-обривчасті системи. Хоча проводово-обривчасті системи охорони мають слабку захищеність від саботажу і як правило є системами одноразової дії, за умови певного вдосконалення методів використання можуть посісти гідне місце в охоронних структурах, особливо під час застосування у комплексі з іншими типами охоронних засобів, в першу чергу радіоохорони.

Під час застосування КС як базового елементу охоронної системи, в першу чергу, постає завдання локалізації місця ушкодження, що напряму пов'язано із вимірюванням дальності. Як відомо, для визначення дальності до ушкодження може використовуватись група енергетичних і неенергетичних методів. Найчастіше під час вимірювання відстані, в тому числі відстані до пошкодження, використовують неенергетичні методи: імпульсний, частотний та фазовий. Для покращення тактичних характеристик можливі також і комбінації цих методів, а також введення надлишкових вимірювань [3]. Найчастіше робота апаратури вимірювання відстані автоматизована або навіть автоматична, а розвиток нейронних мереж обробки сигналів та штучного інтелекту дозволяє застосувати системи прийняття рішень про подальші дії під час аварійної ситуації.

Системні принципи, що покладено в основу даної розробки використовуються тільки для слабкострумових телекомунікаційних та інформаційних однорідних ліній передачі, тому в представленій надалі класифікації не розглядається велика група методів на основі потужних зондуючих сигналів, що викликають, наприклад, іскрові розряди у лінії. Використання неоднорідних ліній, наприклад, лінія типу однопровідний дріт – поверхня, через непередбачуваність умов у ґрунті обумовлює надто великий обсяг робіт з виявлення усіх градієнтів однорідності та їх кореляції з погодними умовами [18]. Найчастіше пристрої, що працюють в таких умовах, проводять вимірювання із наступним контролем, або використовують тільки методи контролю зі специфікою для поставлених завдань.

**Виклад основного матеріалу**

Перед розробкою методу визначення відстані до ушкодження в лінії передачі зазначимо основні вимоги та обмеження, якими користуватимемося в подальшому:

1. Слід дотримуватись максимальної простоти та мінімальної вартості охоронної апаратури для забезпечення коротких строків впровадження.

2. Лінія передачі являє собою тонкий двопровідний симетричний кабель довжиною 1-2 км, що під час вимірювання не може бути відключений від джерел сигналів або енергопостачання. Одночасно із системою вимірювання слід забезпечити можливість передавання телеметричних сигналів, а також сигналів керування сповіщувачами або іншими виконавчими елементами.

3. Точність та розрізнювальна спроможність вимірювання має складати не більше 100 метрів.

4. Метод, що розробляється, має реагувати в найкращому випадку на безконтактну зміну параметрів лінії, а в найгіршому на розрив або коротке замикання лінії передачі. Підключення системи контролю або вимірювання має бути тільки із одного боку лінії передачі. Час реакції системи на ушкодження лінії має складати декілька секунд.

5. Енергоживлення всієї системи визначення відстані має бути автономним не менше доби.

Реалізація виконання вимог в рамках роботи вимагає аналізу існуючих методів та способів вирішення поставленого завдання, а також пропозиції з можливого їх удосконалення, враховуючи сучасний розвиток науки та техніки. Зважаючи на вказані вимоги та аналіз літературних джерел [2, 3], запропонована класифікація методів (рис. 1) автоматичного вимірювання дальності пошкоджень у слабкострумових однорідних лініях передачі та виділено перспективні методи для застосування.

Серед узагальнених класифікаційних ознак, зрозумілих із назви, можливо окремо зупинитись на лінійних та нелінійних методах [3]. В лінійних методах вимірювальна дальність лінійно залежить від вимірювального параметра, а у нелінійних ця залежність завдяки нелінійним елементам обробки може бути складною та більше того –неоднозначною. Найбільш структурно розгалуженими за класифікаційними ознаками є група рефлектометричних методів та група методів аналізаторів параметрів. Рефлектометричні методи спряжені із використанням потужних зондуючих сигналів та неможливістю експлуатації лінії після ушкодження, тому використовуються в охоронних проводових системах слабко. Найбільш перспективними для застосування в охоронних системах на основі КС є методи аналізу параметрів лінії передачі.

Група методів – аналізатори параметрів – розглядає лінію передачі із ушкодженнями як деяке електричне коло та визначає дальність до ушкодження за змінами параметрів цього кола [1,3]. Часто такі методи називають мостовими. Серед мостових методів найбільш часто використовується ємнісний та індуктивний методи, які спроможні визначити дальність до обриву/короткого замикання, за рахунок зменшеної довжини ділянки лінії. Метод петлі (рис. 1) застосовується в багатожильних кабельних лініях та відноситься до групи методів безпосереднього вимірювання, де в багатожильному кабелі дальність визначається за наперед відомим неушкодженим провідником. Загалом, група методів, що проводить аналіз параметрів забезпечує найбільшу точність вимірювання, але дуже часто пристрої, що реалізують цей метод за вартістю не менше вартості рефлектометрів, а за складністю навіть перевищують їх [3].

Метод вимірювання, який розробляється, назвемо методом нелінійної реакції, що відповідно запропонованій класифікації відноситься до віддалених, сегментованих, нелінійних, енергетичних методів, які працюють на постійному струмі (можливе також використання змінного струму). Основа схеми вимірювання у методі нелінійної реакції – точне вимірювання напруги та використання між сегментами лінії елементів із суттєво нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Найбільш простим і дешевим нелінійним елементом є застосування у схемі стабілітронів із різними значеннями напруги стабілізації.

Схема, що ілюструє роботу методу (рис. 2), складається із генератора струму величиною близько декілька міліампер (можливе уточнення), вольтметра (в загальному випадку схеми вимірювання напруги), індикатора та сповіщувача, наприклад, звукового або світлового індикатора. Інформаційні сигнали, що можуть бути подані через лінію передачі, використовують схему гальванічної розв'язки (конденсатор, трансформатор) як на приймальному, так і на передавальному боці лінії передачі для забезпечення суміщення із телекомунікаційними сигналами підключених до лінії додаткових сенсорів.

Метод нелінійної реакції передбачає розділення лінії на сегменти із заданим рівнем точності визначення дальності до ушкодження. На стиках сегментів встановлюються стабілітрони із різними напругами стабілізації $V_0$-$V_N$, де $N$ – кількість сегментів. Під час розподілу стабілітронів по сегментам (рис.3) має виконуватись умова $V_0>V_1>V_2....>V_N$. Значення мінімальної різниці напруги стабілізації між стабілітронами визначає максимальний рівень інформаційного сигналу, що може передаватись по лінії одночасно із функціонуванням схеми контролю в симплексному або дуплексному режимах.

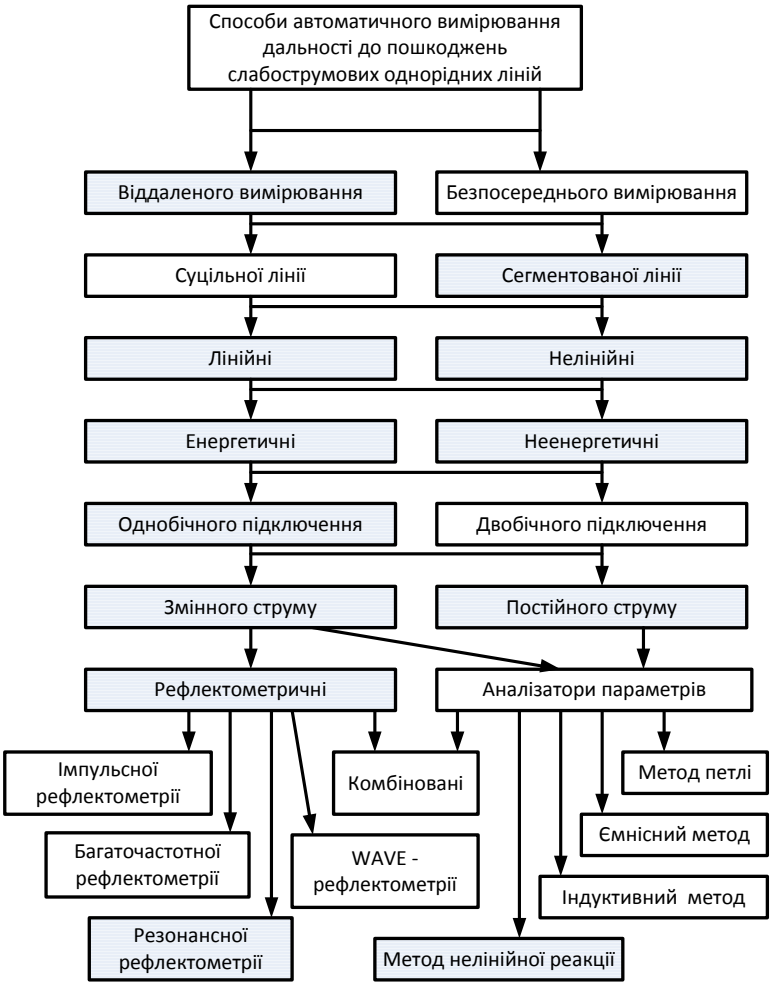



**Рис. 1. Класифікація методів визначення дальності до пошкоджень у слабкострумових однорідних лініях передачі**

Під час роботи схеми за методом нелінійної реакції, в лінію подається напруга, що відповідає заданому значенню постійного струму генератором струму. Значення струму має бути розташовано в межах декількох міліампер із позицій наступного врахування високого питомого опору лінії та вимог автономності. З урахуванням опору типових слабострумових мідних двопровідних кабелів для утворення такого струму на відстанях до 2 км, значення напруги генератора струму складає до 100 В. Якщо поділити всю довжину лінії передачі на 40 сегментів по 50 м, то мінімальна різниця між напругами стабілізації стабілітронів буде не менше 2 В в ідеальному випадку. Якщо знехтувати падінням напруги на сегменті то отримаємо ідеальну залежність вхідної напруги від номеру сегменту, із характером ушкодження – розрив (рис. 3).

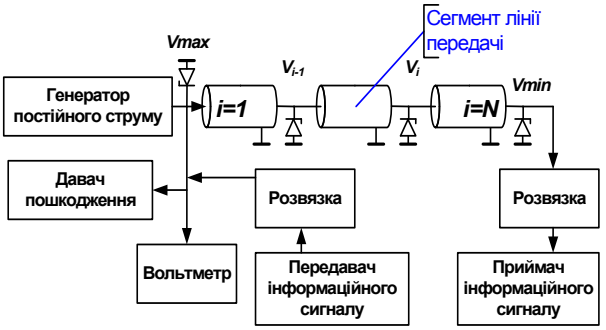



**Рис. 2. Функціональна схема сегментного вимірювача дальності до пошкодження на основі стабілітронів**

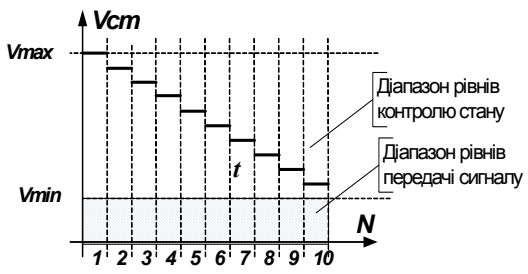



**Рис. 3. Залежність напруги стабілізації від номера ділянки, що контролюється для ідеальних стабілітронів**

Під час нормального режиму роботи (ушкодження відсутні) вольтметр (рис. 2) покаже деяке середнє значення напруги, що визначається падінням напруги на активному опорі сегменту. У випадку розриву деякого сегменту, значення напруги на вході лінії збільшується. Чим більше значення напруги на вході лінії, тим ближче розташований пошкоджений сегмент. У випадку короткого замикання значення напруги на вході лінії відносно нормального режиму зменшується. Чим менше напруга тим ближче сегмент із коротким замиканням до входу

лінії. Отже схема спроможна, за певних умов, фіксувати не тільки факт обриву певного сегменту, але і факт короткого замикання, реалізувавши функцію індуктивного та ємнісного методів одночасно.

Переваги схеми контролю лінії на основі методу нелінійної реакції: простота та дешевизна, кількість структурних елементів мінімальна, усі складові – типові блоки; вимірювання на постійному струмі дозволяє забезпечити високу точність вимірювання; засіб вимірювання за запропонованим методом використовує мінімум енергії і можливе її живлення на основі автономних джерел (оцінка споживаної потужності – не більше декількох Вт); нелінійні елементи природно захищають лінію передачі та систему вимірювання від перенавантажень; схема вимірювання слабко чутлива до параметрів лінії передачі, що дозволяє використовувати її для досить широкого кола двопровідних, в тому числі диференційних ліній передачі.

Використання методу нелінійної реакції також пов'язано із проблемами та недоліками: ВАХ нелінійних елементів має мати різку ділянку обмеження; чутливість методу із зростанням відстані зменшується, тому різниця між рівнями стабілізації наприкінці лінії має бути більшою за різницю між рівнями стабілізації близько генератора; використання нелінійних елементів спряжене із високим рівнем шуму, що може сягати десятки мілівольт, але це набагато менше ніж прогнозована мінімальна різниця між рівнями стабілізації стабілітронів в одиниці вольт. Крім того, кожен стабілітрон генерує характерний тільки йому розподіл шумового процесу, що може бути використано для «тонких» вимірювань та подальшого вдосконалення приладу.

Метод нелінійної реакції припускає велику кількість подальших модифікацій та удосконалень: робота на змінній напрузі із низькою частотою перемикання; використання шумових характеристик стабілітронів; застосування комбінованих методів, наприклад, одночасно із застосуванням рефлектометричних принципів. Можливі також радикальні удосконалення через використання принципів обробки та використання хаотичних сигналів. У випадку використання стрілочних вольтметрів, шкала вольтметра може бути проградуйована в одиницях довжини, що забезпечує зручність отримання кінцевих показників без застосування засобів автоматизації. Принцип вимірювання вимагає застосування стабілітронів із певним кроком напруг стабілізації, що може бути вирішено через використання аналогів стабілітронів на основі нескладних транзисторних схем, що можуть бути серійно реалізовані в інтегральному виконанні.

**Висновки**

1. Проведено аналіз методів локалізації місця розташування пошкодження у лінії на основі теоретичних засад вимірювання відстаней. На основі аналізу методів локалізації розроблена класифікаційна схема методів вимірювання відстані до ушкоджень критичного характеру, в рамках схеми класифікації показано місце запропонованого методу нелінійної реакції.

2. Показана можливість використання методів контролю лінії для побудови охоронних систем. Обґрунтовано основні вимоги для розробки методу, що забезпечує мінімізацію апаратних та кошторисних витрат для контролю сегментованої лінії передачі із можливістю створення телекомунікаційного каналу одночасно із проведенням контролю. Об'єднання функцій лінії як сенсора, оповіщувача, енергетичного та телекомунікаційного (командно-телеметричного) каналу дозволяє забезпечити мінімізацію витрат на проектування, виготовлення та розгортання системи контролю лінії охоронних систем сигналізації несанкціонованого доступу.

3. На основі вимог розроблено метод нелінійної реакції, що використовує суттєво нелінійну ВАХ стабілітронів, включених між сегментами лінії передачі для визначення номеру ушкодженого сегменту на основі вимірювання напруги лише на вході лінії передачі. Виділено переваги та недоліки застосування методу нелінійної реакції в рамках використання в охоронних системах периметрів об'єктів та вказано на можливі способи удосконалення методу.

**Література**

1. Груба И.И. Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения / И.И. Груба. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2012. – 220 с.

2. Елементи і пристрої фізичної та електронної охорони об'єктів : конспект лекцій / П. В. Мокренко ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л. : Фенікс, 2000. – 186 с.

3. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах святи / И.Г. Бакланов. – М. : Изд-во «Эко-Трендз», 1999. –278 с.

**References**

1. Gruba I.I. Sistemy ohrannoj signalizacii. Tehnicheskie sredstva obnaruzheniya / I.I. Gruba. – M. : SOLON-PRESS, 2012. – 220 s.

2. Elementy i prystroi fizychnoi ta elektronnoi okhorony obiektiv : konspekt lektsii / P. V. Mokrenko ; Nats. un-t «Lviv. politekhnika». – L. : Feniks, 2000. – 186 c.

3. Baklanov I.G. Metody izmerenij v sistemah svyati / I.G. Baklanov. – M. : Izd-vo «Eko-Trendz», 1999. –278 s.

Рецензія/Peer review : 6.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: к.т.н., доц. Горященко К.Л.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-158-163
УДК 537.5

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, С.А. КОСТЮК
Хмельницький національний університет

# РОЗРОБКА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ БЕЗДРОТОВИМ СПОСОБОМ В НАВКОЛОРЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМІ

*В статті розглянуто область застосування технології бездротової передачі електричної енергії. Проведено аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянуто методи бездротової передачі електричної енергії, а також проведено аналіз існуючих конструкцій пристроїв та обладнання для реалізації процесу бездротової передачі енергії. Запропоновано схему передавально-приймальної системи з використанням антен у вигляді половини геометричної фігури Е. Бельтрамі. Отримано математичні залежності, які описують процес передачі електричної енергії з використанням зазначених антен. Встановлено основні параметри, які впливають на коефіцієнт передачі електричної енергії. Створено малопотужний лабораторний стенд та проведено лабораторні випробування. На основі отриманих результатів побудовано графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами. Визначено коефіцієнт корисної дії запропонованого пристрою. Розглянуто вплив завад (залізобетонних конструкції тощо) на резонансну частоту передавально-приймальної системи.*

*Ключові слова: бездротова передача електричної енергії, псевдосферична поверхня, потужність електромагнітної енергії, резонансна частота, коефіцієнт корисної дії.*

V.I. LUZHANS′KYY, S.A. KOSTYUK
Khmelnytskyi National University

## DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENT ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEMS UNLOCKED IN A RESONANT MODE

*In the article examined* field of application of the technology of wireless transmission of electric energy. *Conducted analysis of recent research and publications.* The methods of wireless transmission of electric energy are considered, as well as an analysis of existing designs of devices and equipment for the realization of the wireless transmission of energy. Particular attention is paid to low-power transmission systems for the realization of recharging of low-power devices (for example, a mobile phone). The scheme of the transmitting-receiving system with the use of antennas in the form of half a geometric figure by E. Bertrami is proposed. The mathematical dependences are described that describe the process of transmission of electric energy using the indicated antennas. The basic parameters that influence the transmission coefficient of electric energy are established. A low-power laboratory stand was created and laboratory tests were carried out. On the basis of the obtained results, a plot of the dependence of the change in received power on the distance between the transmitting and receiving antennas is constructed. The coefficient of efficiency of the proposed device is determined. The influence of obstacles (reinforced concrete structures, etc.) on the resonance frequency of the transmitting and receiving system is considered. It is established that the proposed device due to the use of antennas of a special configuration is characterized by relatively high efficiency and opens up new possibilities in the field of reception and transmission of electromagnetic waves.

*Keywords:* wireless transmission of electric energy, pseudospheric surface, power of electromagnetic energy, resonance frequency, coefficient of performance.

### Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку науки і техніки в світі існує потреба у передачі електричної енергії значної потужності на значні відстані бездротовим методом. Дана задача, в першу чергу, обумовлюється великою кількістю малопотужних споживачів електричної енергії (рис. 1), які потребують періодичної підзарядки, що доставляє певні незручності, особливо під час користування і обмежує їх переміщення під час зарядки, що призводить до зниження їх продуктивності.

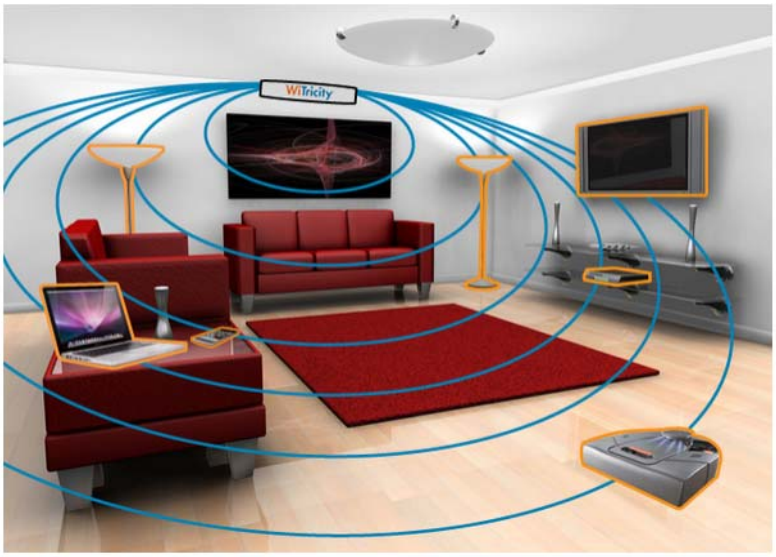



**Рис. 1. Споживачі електричної енергії**

Також дане питання актуальне для підзарядки електромеханічних імплантатів людського організму (серце, нирки), підзарядки дронів та робототехніки (рис. 2).

На даний час існує широка гама методів передачі енергії, але у всіх є спільний недолік – мала відстань та коефіцієнт корисної дії (ККД).

Найбільш важливою і трудомісткою частиною задачі передачі енергії є забезпечення високого

коефіцієнта передачі та збільшення передавальної відстані, не виходячи за межі допустимого рівня випромінювання (для України 2,5 мкВт/см²).

**а)** **б)**

**Рис. 2. Споживачі електричної енергії:**
**а) дрон; б) робот**

Незважаючи на дослідження процесів бездротової передачі енергії як вітчизняними, так і іноземними науковцями в загальному рівень науково-технічного забезпечення для передачі енергії бездротовим методом на значні відстані залишається недостатньо високим [1]. Тому, питання розробки нових та удосконалення існуючих методів і способів передачі енергії на значні відстані є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

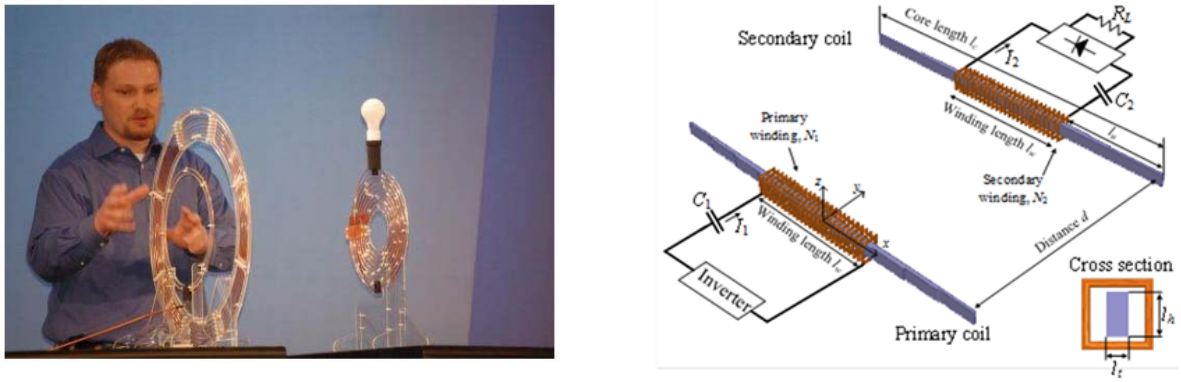
Передачею електроенергії бездротовим способом цікавляться багато дослідників. Явище бездротової передачі енергії в перше відкрив в 1893 році геніальний винахідник Никола Тесла. Але активно почав розвиватись даний напрямок досліджень на початку XX століття багатьма вченими.

Вперше в Росії в 1895 р. О. Попов продемонстрував в роботі перший в світі радіоприймач, що за великим рахунком теж є бездротовою передачею енергії.

Так, в 1904 р. на виставці St. Louis World's Fair (в Сент-Луісє, штат Міссурі, США) був вручений цінний приз групі винахідників за успішний запуск електродвигуна літака потужністю 60 Вт на відстані до 30 метрів.

У 1975 р. у Каліфорнії вчені зуміли передати на відстань 60 метрів 10 кВт електроенергії у мікрохвильовому діапазоні з ККД 40 відсотків [2].

Цікаву технологію бездротової передачі енергії (магнітно-резонансна система «Coupled Magnetic Resonance System, CMRS») запропонувала група винахідників з Массачусетського технологічного інституту в 2007 році. На рисунку 3а відображено світлину з першої презентації запропонованої системи. Така система забезпечує передачу електричної енергії на відстань 2,1 метра. Технологія CMRS зіткнулася з деякими обмеженнями, які перешкоджають її впровадженню в масове виробництво: складна конфігурація котушок, великі їх розміри, висока частота передачі і занадто висока чутливість до зовнішніх перешкод, наприклад таких як присутність людини [3].




**а)** **б)**

**Рис. 3. Загальна конфігурація:**
**а) Алансон Сампл з першою презентацією технології CMRS на форумі IDF 2008; б) система DCRS**

Відомий спосіб бездротової передачі електроенергії запропонований вченими з Південної Кореї, в

основу якого покладено принцип резонансної системи з дипольних котушок (Dipole Coil Resonant System) DCRS. Система DCRS дозволяє передавати електроенергію на відстань до 5 метрів. Запропонована система позбавлена недоліків притаманних CMRS характеризується вищою завадостійкістю та реалізується за допомогою відносно компактних котушок 10×20×300 см. Принципова схема системи DCRS наведена на рис. 3б.

Як показали експериментальні випробування, запропонована система дозволила на частоті 20 кГц передати 1400 Вт з ККД 36,9 % на відстань 3 метра і 209 Вт на відстань 5 метрів з ККД 9,2% [4].

Слід відзначити, що незважаючи на переваги запропонованих способів передачі енергії існують спільні недоліки – низькі ККД та завадостійкість.

Відомий спосіб бездротової передачі електроенергії, запропонований групою вітчизняних вчених [5], який дозволяє передавати електричну енергію з коефіцієнтом корисної дії близьким до 100% через вільний простір. Суть запропонованого рішення полягає у тому, що передавальна та приймальна антени виконані у вигляді псевдосфери і утворюють електрично замкнуту систему, яка частково включає в себе енергію електромагнітного поля Землі. За рахунок збудження (активації) електромагнітного поля Землі в системі відбувається передача електроенергії від передавальної до приймальної антени з ККД ≈1. Принципова схема такої системи наведена на рис. 4.

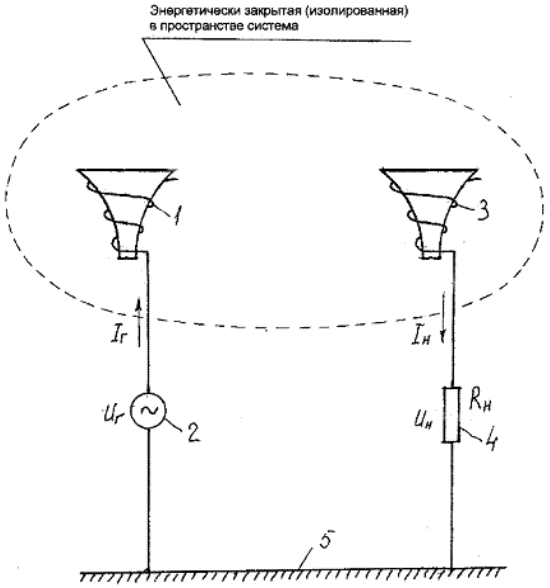



**Рис. 4. Принципова схема системи бездротової передачі електроенергії:**
**1 – передавальна антена; 2 – генератор; 3 – приймальна антена; 4 – перетворювач; 5 – заземлення**

Аналіз приведених способів передачі енергії бездротовим методом вказує на перспективність даного напрямку, а також на доцільність проведення досліджень та розробки методик і нових підходів в зв'язку з недостатнім вивченням процесів, а також на розробку пристроїв, які б дозволяли передавати та приймати енергію для живлення і підзарядки малопотужних пристроїв.

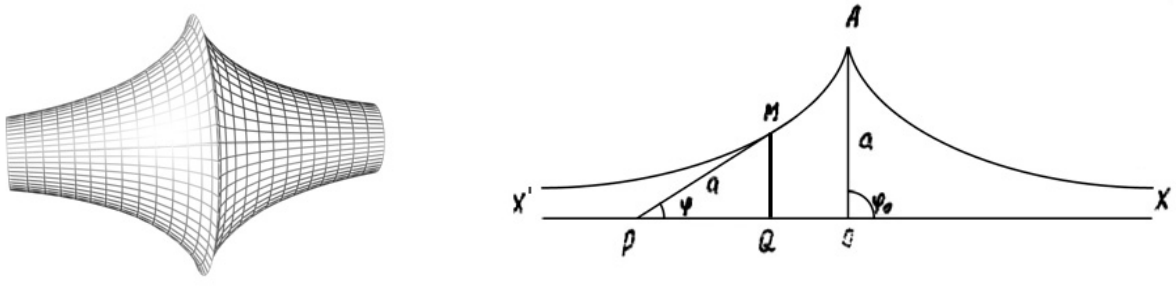
**Мета статті.** Розробка високоефективних систем передачі електричної енергії бездротовим способом в навколорезонансному режимі з використанням антен у вигляді псевдосфери.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

Для досягнення поставленої мети в роботі пропонується проводити подальші дослідження в області підзарядки мобільних телефонів та інших пристроїв.

Елементами передавально-приймальної системи є: генератор частоти, підсилювач, вольтметр, а також передаюча та приймаюча антени, які виконані у вигляді фігури Е. Бельтрамі, яка ґрунтується на геометрії гіперболоїда М. Лобачевського. Антени являють собою дві половини просторової геометричної фігури, яка реалізована на базі 5-го постулата геометрії М. Лобачевского: *через точку, яка не лежить на прямій, проходить по крайній мірі дві прямих, які лежать з даною прямою в одній площині і не перетинають її [6]*.

Так, в 1863 р. італійський математик Е. Бельтрамі встановив, що всі властивості площини геометрії М. Лобачевського реалізуються на поверхні псевдосфери – геометричного тіла, властивості якого збігаються, або протилежні властивостям сфери. На рис. 5а зображена псевдосфера, а на рис. 5б її твірна – трактриса з асимптотою X'X. У разі рівного розподілу радіусів великих кіл (паралелей) псевдосфери і сфери можна кількісно порівнювати об'єми і площі їх поверхонь.




**а)** **б)**

**Рис. 5. Параметри псевдосфери:**
**а) псевдосфера; б) твірна псевдосфери – трактриса**

Дана фігура характеризується рядом переваг і являє собою нескінченно протяжне в просторі тіло псевдосфери, яке має кінцевий обсяг і кінцеву площу поверхні. Саме ця властивість псевдосфери дозволяє за допомогою антен-напівпсевдосфер створити кінцеву, обмежену в просторі, енергетично замкнуту систему, що є необхідною умовою для передачі енергії з високим ККД.

Ще однією відмінною рисою є те, що всі точки на поверхні псевдосфери є гіперболічними, розривними в просторі (рис. 6).

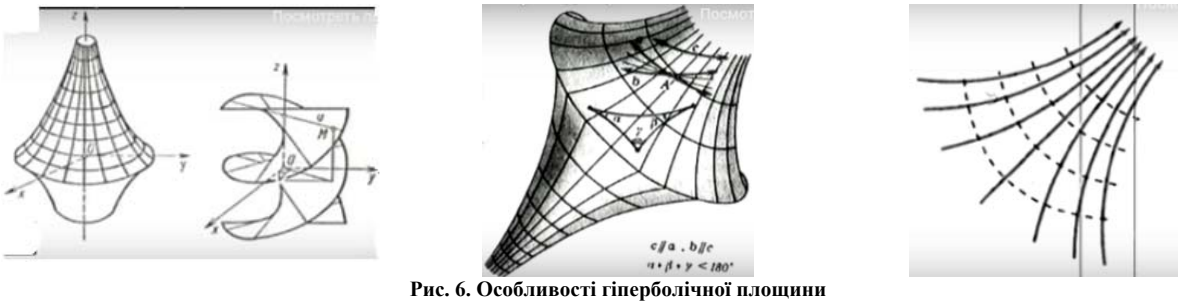


**Рис. 6. Особливості гіперболічної площини**

Стосовно до антен-напівпсевдосфер передавально-приймального пристрою це рівносильно розривам – квантуванню електричного і магнітного полів в кожній точці дроту намотки котушок антен. Це призводить до електромагнітних збурень хвиль, довжина яких співрозмірна з діаметром дроту намотування котушок антен, тобто практично довжина таких хвиль становить величину порядка 1 мм і менше. Такі електромагнітні хвилі, як свідчить теорія і практика, здатні через поляризацію молекул повітря або безпосередньо активізувати електромагнітне поле Землі і тим самим компенсувати втрати електромагнітної енергії на шляху передачі, чим і досягається підвищення ККД.

Також відомо, що така конструкція антен дозволяє поєднувати в собі принцип сповільнюючих систем [5], за рахунок чого досягається зменшення довжини хвилі і формування біжучих хвиль на невеликих відстанях.

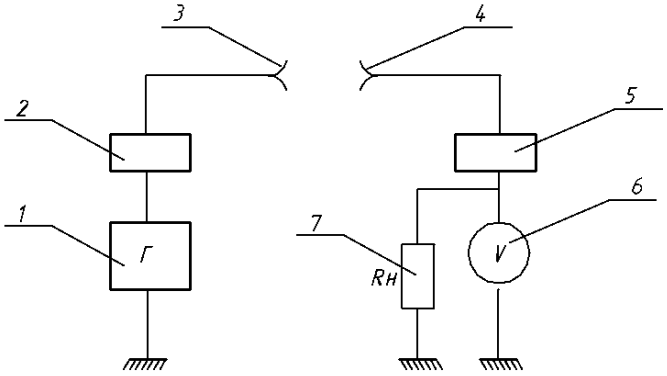



**Рис. 7. Принципова схема передавально-приймальної системи:**
**1 – джерело електроенергії (генератор); 2 – підсилювач; 3 – передавальна антена; 4 – приймальна антена;**
**5 – перетворювач змінно-постійної напруги; 6 – вольтметр; 7 – активне навантаження**

Проаналізувавши усі переваги та властивості псевдосферичної випромінюючої поверхні, можна стверджувати, що просторово-часовий стан випромінювання електромагнітних полів носить імперсональний характер.

Для передачі електричної енергії розроблено передавально-приймальну систему, принципова схема якої відображена на рис. 7.

Основними параметрами системи є потужність на вході та виході системи, напруженість електромагнітного поля, резонансна частота, ємність та індуктивність котушок антен.

Відомо, що потужність випромінювання електромагнітної енергії за одиницю часу через замкнену поверхню визначається за відомою формулою:

$$\oint [\vec{E}\vec{H}]dS = \oint \vec{\Pi} dS, \tag{1}$$

де $\vec{\Pi}$ – вектор об'ємної щільності потоку електромагнітної енергії, вектор Пойтінга; *dS* – елементарна площа замкненої поверхні; $\vec{E}$ – вектор напруженості електричного поля; $\vec{H}$ – вектор напруженості

магнітного поля.

Враховуючи, що $E=H/120\pi$, де $120\pi$ – хвильовий опір простору 375 Ом, а інтеграл поверхні $dS$ – елементарна площа замкненої поверхні:

$$\int dS = S_C = 4\pi r^2, \tag{2}$$

де $S_C$ – площа сфери; $r$ – радіус сфери.

Вектор напруженості електричного поля $\vec{E}$ з врахуванням (1) може бути визначений [5]:

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{30\Pi}}{r}, \tag{3}$$

де $P$ – потужність електромагнітного поля.

При відомих $P$ та $r$ дана формула є базовою при розрахунках напруженості електричного поля.

З врахуванням теореми Гауса-Остроградского для напів-певдосферичної антени процес безпровідної передачі електричної енергії можна описати залежністю:

$$P_\Gamma \to \frac{1}{4}\int_{Vc} div\left[\vec{E}\vec{H}\right]dV_C - \frac{1}{4}\int_{Vc\oplus} div\left[\vec{E}\oplus\vec{H}\oplus\right]dV_{C\oplus} = \frac{1}{4}\int_{Vc\Theta} div\left[\vec{E}\Theta\vec{H}\Theta\right]dV_{C\Theta} - \frac{1}{4}\int_{Vc} div\left[\vec{E}\vec{H}\right]dV_C \to P_\Pi, \tag{4}$$

де $P_\Gamma$ – потужність генератора; $P_\Pi$ – прийнята потужність; 1/4 – числовий коефіцієнт, який зв'язує об'єм сфери $V_C$ та півпсевдосфери $V_\Pi$ і описується рівністю: $\frac{1}{4}V_C = \frac{1}{2}V_\Pi$ [5].

Резонансна частота визначається за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{5}$$

де $L$ – індуктивність антени; $C$ – власна паразитна ємність.

Для дослідження процесу передачі енергії згідно з запропонованою схемою (рис. 7) створено експериментальну установку, принципова схема якої наведена на рис. 8.

Експериментальна установка складається з передавальної та приймальної систем. Передавальна система містить джерело електричної енергії, генератор з можливість регулювання частоти, підсилювача та передавальної антени. Приймальна система складається з приймальної антени, перетворювача напруги та активного навантаження.

Робота пристрою здійснюється наступним чином: передавальна антена 2 збуджується джерелом (генератором) електричної енергії 1 і випромінює сповільнену електромагнітну хвилю. За рахунок антени 3 (приймальної) приймається енергія електромагнітної хвилі і перетворюється у постійну напругу за рахунок перетворювача. Заземлення необхідне для збільшення струму на виході приймальної системи.

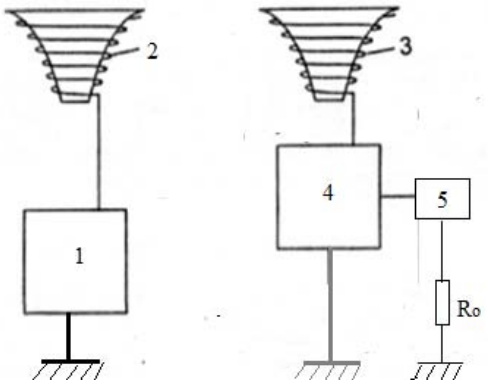



**Рис. 8. Принципова схема експериментальної установки для бездротової передачі електроенергії: 1 – джерело електроенергії (генератор); 2 – передавальна антена; 3 – приймальна антена; 4 – перетворювач змінно-постійної напруги; 5 – споживач; $R_0$ – опір провідника (користувача)**

Значення $L$ та $C$ антен визначались експериментально і складали відповідно: $L$ = 9 мГн; $C$ = 4 пф. Потужність на виході генератора складала 20 Вт. Частота розраховувалась за формулою (5) і складала $f$ = 840 кГц.

Дослідження процесу передачі енергії проводились з варіюванням відстані між передавальною та приймальною антенами. Результати експериментальних досліджень зведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати експериментальних досліджень**

| Відстань між передавальною та приймальною антенами ⌊, м | Прийнята потужність $P_\Pi$, Вт | Коефіцієнт корисної дії, % |
|---|---|---|
| 1 | 17 | 85 |
| 1.2 | 15 | 75 |
| 1.4 | 9 | 45 |
| 1.6 | 5.5 | 27.5 |
| 1.8 | 3 | 15 |
| 2.0 | 1.2 | 6 |
| 2.2 | 0.8 | 4 |

За результатами експериментальних досліджень отримано графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами, рис. 9.

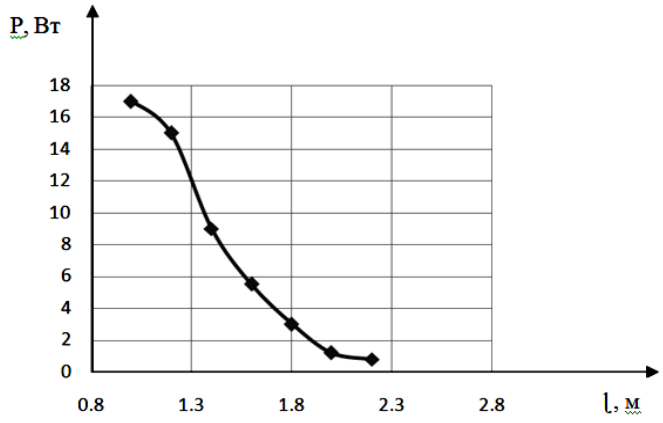



**Рис. 9. Графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами**

Запропонований пристрій за рахунок використання антен особливої конфігурації характеризується відносно високим коефіцієнтом корисної дії та відкриває нові можливості в області прийому та передачі електромагнітних хвиль.

**Висновки**

Розглянуто методи бездротової передачі електричної енергії, а також проведено аналіз існуючих способів, конструкцій пристроїв та обладнання для реалізації процесу прийому-передачі електромагнітних хвиль. Особливу увагу приділено малопотужним передавальним системам для реалізації підзарядки пристроїв малої потужності (наприклад мобільного телефону).

Запропоновано схему передавально-приймальної системи з використанням антен у вигляді половини геометричної фігури Е. Бельтрамі. Створено малопотужний лабораторний стенд та проведено лабораторні випробування. Отримано графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами. Встановлено, що зі зростанням відстані між передавальною та приймальною антенами від 1 метра до 2,2 метра прийнята потужність становить від 17 Вт до 0,8 Вт відповідно, при цьому коефіцієнт корисної дії зменшується від 85% до 4%.

Встановлено, що запропонований пристрій за рахунок використання антен особливої конфігурації характеризується відносно високим коефіцієнтом корисної дії та відкриває нові можливості в області прийому та передачі електромагнітних хвиль.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення впливу завад (залізобетоні конструкції тощо) на процес передачі енергії та резонансну частоту передавально-приймальної системи.

**Література**

1. Передача электроэнергии без проводов от начала до наших дней [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://habr.com/ru/post/373183.

2. Бельдій М.М. Без дротів та розеток / М.М. Бельдій // Винахідник та раціоналізатор. – 2018. – № 2. – С. 4–10.

3. A Kurs, A. Karalis, R. Moffatt. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. URL: http://science.sciencemag.org/content /317/5834/83.full.

4. Беспроводная передача энергии на 5 метров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://habr.com/ru/post/219857/

5. Патент на винахід 116145 Україна, МПК H01Q 19/00. Пристрій для передачі електроенергії через вільний простір / Крюк В.Г., Яцишин В.А., Бельдій М.М. ; заявл. 13.07.2004 ; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

6. Геометрия М. І. Лобачевского // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1969–1978.

**References**

1. Peredacha elektroenergii bez provodov ot nachala do nashih dnej [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://habr.com/ru/post/373183.

2. Beldii M.M. Bez drotiv ta rozetok / M.M. Beldii // Vynakhidnyk ta ratsionalizator. – 2018. – № 2. – S. 4–10.

3. A Kurs, A. Karalis, R. Moffatt. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. URL: http://science.sciencemag.org/content /317/5834/83.full.

4. Besprovodnaya peredacha energii na 5 metrov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://habr.com/ru/post/219857/

5. Patent na vynakhid 116145 Ukraina, MPK N01Q 19/00. Prystrii dlia peredachi elektroenerhii cherez vilnyi prostir / Kriuk V.H., Yatsyshyn V.A., Beldii M.M. ; zaiavl. 13.07.2004 ; opubl. 15.02.2007, Biul. № 2.

6. Geometriya M. I. Lobachevskogo // Bolshaya sovetskaya enciklopediya : [v 30 t.] / gl. red. A.M. Prohorov. – 3-e izd. – M. : Sovetskaya enciklopediya, 1969–1978.

Рецензія/Peer review : 18.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-164-168
УДК 007.2:303.832

М.В. БАЧИНСЬКИЙ
Тернопільський національний технічний університет

# КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА ПРИ ДІЇ НА ЙОГО ОРГАНІЗМ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО СВІТЛОДІОДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*В статті запропоновано дві моделі кольорової стимуляції, які основані на алгоритмах активації і релаксації, метою яких є мобілізація резервних можливостей та активація фізіологічних процесів (симпатична нервова система) з одного боку, і мінімізація енергетичних витрат та збереження власних ресурсів (парасимпатична нервова система) – з іншого. Критерієм є відношення частоти серцевих скорочень до частоти дихання, збільшення якого характерно для стратегії активації і зменшення – до стратегії помірної релаксації. Проведено порівняльний аналіз впливу світлодіодних джерел на деякі показники психофізіологічного статусу, в т. ч. на функціональний стан зорового аналізатора, адаптаційний потенціал, силу і рівень врівноваженості процесів гальмування і збудження, емоційний стан досліджуваних. Одним із найбільш поширених способів визначення впливу на організм оператора дозованого фізичного навантаження є функціональна проба. Діагностичне значення функціональної проби полягає в її спроможності визначати для оцінювання функціонального стану оператора ступінь пристосованості організму до фізичних навантажень з урахуванням їх персоніфікованого об'єму та інтенсивності, виявлення прихованих відхилень, прогнозування адаптивних характеристик діяльності оператора. Функціональна проба найбільш повно дозволяє врахувати багатогранність поняття «функціональний стан», яке в більшості ситуацій, базується на одному з трьох основних підходів. В результаті проведених досліджень дозволяють стверджувати, що застосування комплексного підходу до визначення функціонального стану оператора сприяє зменшенню неоднозначностей і невідповідностей в оцінюванні його стану. Виявлено і підтверджено, що ІЧ-випромінювання є репрезентативним параметром, який відображає реакцію оператора на різні зовнішні впливи, в т. ч. і світлодіодні.*

*Ключові слова: функціональний стан, низькоінтенсивне світлове випромінення, комплексний підхід, фізіологічні процеси, критерій, оцінки.*

M.V. BACHYNSKYI
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## COMPLEX APPROACH TO DETERMINING THE FUNCTIONAL STATE OF THE OPERATOR AFTER THE ACTION OF ITS ORGANISM OF LOW-INTENSITY LIGHTNING RADIATION

*Two models of color stimulation based on activation and relaxation algorithms are proposed in the article, the purpose of which is mobilization of reserve capabilities and activation of physiological processes (sympathetic nervous system) on the one hand, and minimization of energy costs and preservation of own resources (parasympathetic nervous system) - from another The criterion is the ratio of the heart rate to the respiratory rate, an increase which is characteristic of the strategy of activation and reduction - to the strategy of moderate relaxation. A comparative analysis of the influence of LED sources on some indicators of psycho-physiological status, including on the functional state of the visual analyser, adaptive potential, strength and level of balance of processes of inhibition and excitation, emotional state of the subjects under investigation are carried out. One of the most common ways of determining the effect on the body of the metered-dose operator is a functional test. The diagnostic value of a functional test consists in its ability to determine the degree of adaptability of an organism to physical activity, taking into account their personified volume and intensity, detecting hidden deviations, predicting adaptive characteristics of the operator's activity for the estimation of the functional state of the operator. The functional test most fully allows you to take into account the many-sidedness of the concept of "functional state", which in most situations, is based on one of the three main approaches. As a result of the conducted research it can be argued that the application of the integrated approach to the definition of the functional state of the operator contributes to the reduction of ambiguities and inconsistencies in the assessment of its state. It has been revealed and confirmed that IR radiation is a representative parameter that reflects the operator's response to various external influences, including LEDs.*

*Keywords: functional state, low-intensity light radiation, complex approach, physiological processes, criterion, evaluation.*

### Вступ

Функціональний стан і підготовленість оператора, його фізична працездатність знаходяться в прямій залежності від стану здоров'я, яке, в процесі виконання професійної діяльності піддається впливу внутрішніх і зовнішніх факторів, контрольованих і неконтрольованих, регулярних і випадкових, позитивних і негативних тощо.

В будь-якому разі, така ситуація вимагає свого розв'язку шляхом постійного або періодичного оцінювання і визначення поточного рівня функціонального стану оператора, що в абсолютній більшості випадків реалізовано за допомогою зовнішнього діагностування і корекції (стимуляції). В більшості випадків такий підхід є життєздатним і таким, що отримав широке застосування в різних сферах операторської діяльності.

Водночас, досить часто виникають неоднозначності в інтерпретації результатів оцінювання ФС оператора, особливо в умовах дії різного роду випромінювань, і перш за все – низькоінтенсивного світлодіодного випромінювання, що потребує додаткових підходів і заходів до усунення таких неоднозначностей.

### Аналіз літературних джерел за даною темою

В роботі [1] запропоновано дві моделі кольорової стимуляції, які основані на алгоритмах активації і

релаксації, метою яких є мобілізація резервних можливостей та активація фізіологічних процесів (симпатична нервова система) з одного боку, і мінімізація енергетичних витрат та збереження власних ресурсів (парасимпатична нервова система) – з іншого. Критерієм є відношення частоти серцевих скорочень (ЧСС) до частоти дихання (ЧД), збільшення якого характерно для стратегії активації і зменшення – до стратегії помірної релаксації [1].

Проведено порівняльний аналіз впливу світлодіодних джерел на деякі показники психофізіологічного статусу, в т.ч. на функціональний стан зорового аналізатора, адаптаційний потенціал, силу і рівень врівноваженості процесів гальмування і збудження, емоційний стан досліджуваних [2].

Адаптаційний потенціал (АП) оцінювався як кількісне визначення рівня ФС організму та його систем і був розрахований без тестів навантаження: АП = 69-100% – низькі витрати адаптаційних ресурсів; АП = 55-69% – середні витрати; АП < 50% - високий рівень витрат адаптаційних ресурсів [2].

Сприйняття світла зоровим аналізатором оператора полягає в трансформації просторових амплітудно-частотних характеристик (ПАЧХ) ЕМВ спеціальними клітинами сітківки ока в АЧХ нервових імпульсів нервових каналів, що посилаються в зорову область кори головного мозку. В нейронах відбувається кінцева фаза трансформації з формуванням просторових зорових образів зовнішнього світла. Зорова кора пов'язана нервово-гуморальними механізмами практично з усіма регуляторними структурами центральної нервової системи, включаючи її вегетативну частину [3]. Отже, існує принципова можливість використання цього механізму в штучному впливі на органи і системи організму людини шляхом дії на зоровий аналізатор спеціально підібраними світловими імпульсами.

Світлові імпульси впливають на світлочутливі клітини райдужної оболонки і сітківки ока, під їх впливом періодично скорочуються мікром’язи хрусталика та очного яблука. Опосередкована дія світлокольорового імпульсного впливу активує центри кори головного мозку і забезпечує ефективну психоемоційну корекцію роботи мозку і всієї ЦНС [4].

Одним із найбільш поширених способів визначення впливу на організм оператора дозованого фізичного навантаження є функціональна проба [5]. Діагностичне значення функціональної проби (ФП) полягає в її спроможності визначати для оцінювання функціонального стану оператора (ФСО) ступінь пристосованості організму до фізичних навантажень з урахуванням їх персоніфікованого об’єму та інтенсивності, виявлення прихованих відхилень, прогнозування адаптивних характеристик діяльності оператора. ФП найбільш повно дозволяє врахувати багатогранність поняття «функціональний стан», яке в більшості ситуацій, базується на одному з трьох основних підходів [6].

Згідно активаційного підходу різні ФС – це різні ступені фізичної активності організму, які зумовлені різними рівнями нервової активації. В межах даного підходу ФС та фізіологічний стан розглядаються як синоніми.

З точки зору діяльнісного підходу, ФС розглядається як системна відповідь організму (інтегральна реакція, результат) його на включення в ту чи іншу діяльність. Як компоненти ФС розглядаються оперативний спокій, стан працездатності і різні форми психологічного стресу. Даний підхід дозволяє дати ще одне визначення ФС, як таке, що забезпечує людині можливість в конкретних умовах соціального життя в найбільшому ступені реалізовувати потенціал закладених в нього генетичних програм (Вайнер, 2001 р.).

І нарешті – адаптаційний підхід, згідно якому, ФС – це інтегральна характеристика рівня напруженості адаптаційних механізмів організму.

Стає зрозумілим, що для проведення легітимного дослідження, необхідно визначити та обґрунтувати, який підхід та яке визначення поняття функціонального стану використано при його проведенні.

**Мета** – обґрунтувати необхідність і доцільність застосування комплексного підходу до визначення ФС оператора при дії на його організм низькоінтенсивного світлового випромінювання.

**Основний текст статті**

Визначимо функціональний стан оператора як інтегральний комплекс різних характеристик і процесів, властивостей та якостей людини, які прямо або опосередковано зумовлюють виконання діяльності (В. І. Медведєв) або іншими словами, під функціональним станом оператора будемо розуміти стан його нервової системи, який адекватний фону або рівню її активності, на якому реалізуються поведінкові акти. Рівень активності нервової системи також є інтегральною характеристикою роботи головного мозку, яка визначає рівень працездатності і поведінку оператора (В. Л. Марищук).

Використання понять надійності та ціни діяльності є підставою для створення загальної класифікації функціональних станів. За допомогою критеріїв надійності функціональний стан характеризується як здатність людини виконувати професійну діяльність на заданому рівні точності, своєчасності, безвідмовності. За показниками ціни діяльності здійснюється оцінка функціонального стану з урахуванням ступеня виснаження сил організму, і в кінцевому підсумку, його впливу на здоров'я людини. На підставі зазначених критеріїв вся множина функціональних станів ділиться на два основні класи. Допустимі функціональні стани, які по-перше, за критерієм надійності дозволяють здійснювати діяльність, ефективність якої не нижче допустимого рівня, а по-друге, – за критерієм ціни діяльності вони не впливають негативно на здоров'я людини. Неприпустимими є такі функціональні стани, при яких ефективність діяльності переходить нижні межі заданої норми (оцінка за критерієм надійності) або з'являються симптоми порушення здоров'я (оцінка за критерієм ціни діяльності) [7].

Надмірне напруження фізіологічних і психологічних ресурсів людини є потенційним джерелом

виникнення різних патологій. На цій підставі виділяють іншу класифікацію нормальних і патологічних станів. Очевидно, що останній клас є предметом медичних досліджень. Однак існує велика група граничних станів, виникнення яких може призвести до хвороби. Наприклад, хронічна втома є граничним станом по відношенню до перевтоми. З точки зору наведеної вище класифікації всі граничні стани відносяться до категорії неприпустимих. Вони вимагають проведення відповідних профілактичних заходів, в розробці яких безпосередню участь повинні брати і психологи [7].

Ще одна максимально загальна класифікація функціональних станів будується на підставі критерію адекватності відповідної реакції людини вимогам діяльності, що виконується. Відповідно до цієї концепції, яка розроблена В.І. Медведєвим [8], всі стани людини можна розділити на дві групи: стани адекватної мобілізації і стани динамічної неузгодженості. Стани адекватної мобілізації характеризуються повною відповідністю ступеня напруженості функціональних можливостей людини вимогам, що пред'являються конкретними умовами. Вони також можуть порушуватися під впливом різних причин: тривалої діяльності; підвищеної інтенсивності навантаження; накопичення втоми і т.д. Тоді виникають стани динамічної неузгодженості – реакція в цьому випадку неадекватна навантаженню або необхідним психофізіологічним витратам, що перевищують реальні можливості людини. Усередині цієї класифікації можуть бути охарактеризовані практично всі стани працюючої людини [8].

Стан адекватної мобілізації – це оптимальний або близький до оптимального стан оператора для даних умов роботи, який включений в конкретну систему управління. Симптоматика і виразність цього стану залежать, перш за все, від обсягу інформації, її щільності та екстенсивності, семантичної значущості, характеру кодування, наявності шуму, необхідних програм реалізації прийнятої інформації і особливостей керованої системи. Чим більше поточний стан відрізняється від стану оперативного спокою, тим більше виражена активна мобілізація [8, 9], характерною рисою якої є її лінійність, тобто наявність прямої залежності від суб'єктивних труднощів виконуваної роботи.

Першим кроком діагностики або прогнозування такого стану є кількісний аналіз інформаційної моделі робочого процесу для з'ясування, який елемент цієї діяльності в першу чергу визначає ступінь адекватної мобілізації. У більшості випадків оперативною точкою для судження слугує положення знайдених характеристик на шкалі граничних можливостей людини [8, 9].

Виявлення провідної функції діяльності вирішує питання про те, яка властивість або властивості оператора визначають рівень її виконання, а стан відповідних функцій характеризує ступінь адекватної мобілізації. При цьому змінюється і стан зв'язаних з провідною функцією систем неспецифічного забезпечення і регулюючих нервових утворень. Оскільки стан цих систем не відволікає оператора від виконання основних обов'язків, а самі показники досить тісно корелюють з рівнем роботи основної системи, то про ступінь напруженості судять саме за станом цих систем [9].

Стан адекватної мобілізації характеризується мінімальним числом помилок в роботі і вибором оптимального алгоритму діяльності [9].

Стан динамічної неузгодженості – це стан, при якому порушується основна закономірність попередньої стадії – рівень роботи по сприйняттю інформації не відповідає очікуваному фізіологічному стану. Для такого стану характерні суттєві зрушення вегетативних реакцій, поява додаткових реакцій, зокрема потовиділення, розширення судин шкіри, порушення м'язового балансу і ін. Даний стан надзвичайно важливий для оцінки роботи фахівця, оскільки він супроводжується вираженими порушеннями працездатності та появою великої кількості помилок, зайвими діями, збільшенням часу роботи, аж до відмови від роботи або її припинення [8, 9].

Узагальнений характер динамічної неузгодженості призводить до того, що помилки і неправильні дії спостерігаються навіть тоді, коли оператор повинен виконувати необхідні за ходою роботи нескладні для нього дії, які в іншому стані виконувались безвідмовно. На цій підставі оснований один із прийомів оцінки неузгодженості, коли оператору в процесі роботи пропонують пройти ряд тестів зростаючої складності, зазвичай добре виконуваних. Чим простіший тест, при якому виникла складна ситуація або помилка, тим глибша динамічна неузгодженість [8, 9].

Динамічна неузгодженість є більш стійкою, ніж адекватна мобілізація; зменшення інтенсивності навантаження не призводить до ліквідації цього стану і появи адекватної мобілізації. Водночас, необхідний певний час, перш ніж ознаки неузгодженості зникнуть [9].

Будемо розглядати функціональний стан оператора як множину його складових: ФСЗА – функціонального стану зорового аналізатора; ФССА – функціонального стану слухового аналізатора; ФССCС – функціонального стану серцево-судинної системи; ФСЦНС – функціонального стану центральної нервової системи; ФСДС – функціонального стану дихальної системи; ФСФПЗ – функціонального стану фізичної працездатності (рис. 1), яку доповнено ФССОО – функціональним станом, що визначається за самооцінкою оператора. Введення додаткової складової ФССОО суттєво зменшує невизначеність оцінки ФС оператора і дозволяє зробити її комплексною, такою, що враховує об’єктивно-визначені ФС (ФСЗА, ФССА, ФСЦНС, ФСДС, ФСФПЗ) та суб’єктивний, визначаємий самим оператором (ФССОО).

Функціональний стан оператора методом самооцінки пропонується оцінювати за трьома нескладними і комфортними тестами, які одночасно мають високу інформативність: тест САН [10], методика оцінки працездатності і фізичного стану [11] та тест класифікації операторів на аудіали, візуали і кінестетики [4].

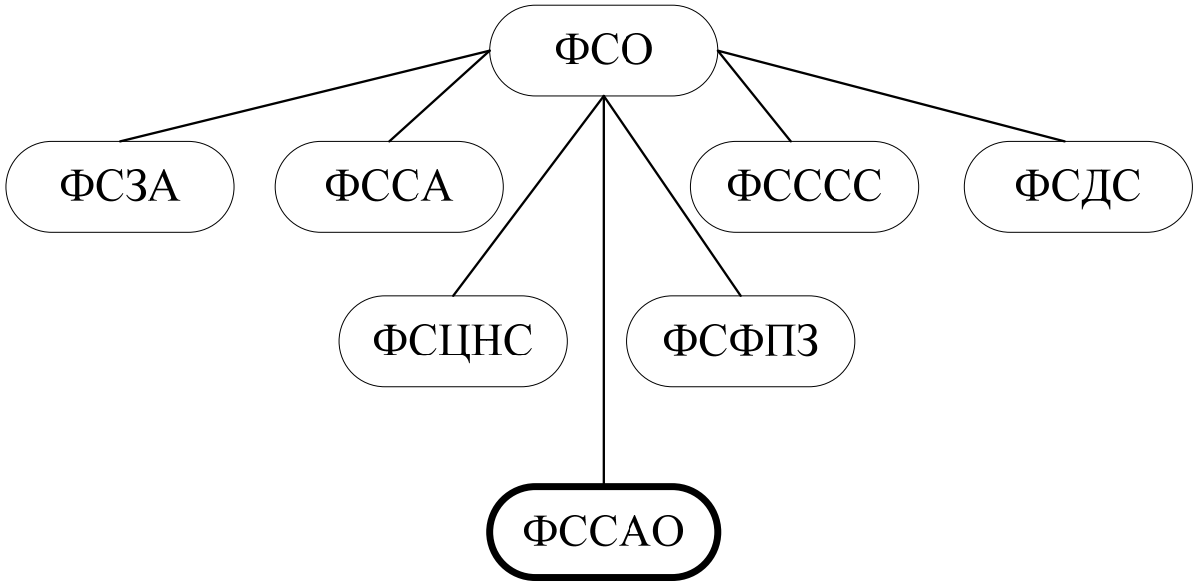



**Рис. 1. ФС оператора як множина ФС**

Методика оцінки працездатності і фізичного стану належить до розрахункових і не потребує будь-яких спеціальних вправ або процедур. Відповідно до неї рівень фізичного стану (РФС) оператора можна розрахувати за такою формулою [11]

$$РФС = 700 - 3 * ЧСС - 2,5 * ATcp - 2,7B + MT / 350 - 2,6 * B + 0,21ДТ,$$

де *ЧСС* – частота серцевих скорочень за 1 хв. в спокої; *ATcp* – середній артеріальний тиск (*ATcp* = *АТС*+*АТД*-*АТД*/3); *В* – вік; *МТ* – маса тіла, кг; *ДТ* – довжина тіла, см.

Критерії відповідності *РФС* для чоловіків і жінок наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

| РФС | Чоловіки | Жінки |
|---|---|---|
| 1 (низький) | 0,225-0,375 | 0,157-0,260 |
| 2 (нижче середнього) | 0,376-0,525 | 0,261-0,365 |
| 3 (середній) | 0,526-0,675 | 0,366-0,475 |
| 4 (вище середнього) | 0,676-0,825 | 0,476-0,575 |
| 5 (високий) | 0,836 і більше | 0,576 і більше |

Тест класифікації операторів на аудіали, візуали і кінестетики [4] передбачає вибір оператором одного з чотирьох варіантів відповідей на пропоновані 4 висловлювання, після чого підрахунок балів і визначається провідна система [4].

Якщо провідною є аудіальна система, то світлові впливи краще проводити на внутрішні бокові поля зору; візуальна – на верхні; кінестетична – на нижні; дискретна – на бокові зовнішні поля зору [4].

**Висновки**

Результати проведених досліджень дозволяють стверджувати, що застосування комплексного підходу до визначення ФС оператора сприяє зменшенню неоднозначностей і невідповідностей в оцінюванні його стану.

Виявлено і підтверджено, що ІЧ-випромінювання є репрезентативним параметром, який відображає реакцію оператора на різні зовнішні впливи, в т.ч. і світлодіодні.

**Література**

1. Пятакович Ф.А. Биотехническая система мультипараметрического игрового тренинга, направленная на модификацию функционального состояния человека / Ф.А. Пятакович, М.А. Сурушкин, Т.И. Якунченко и др. ; НИУ БелГУ // Научные ведомости БелГУ. Сер. Медицина. Фармация. – 2011. – № 10(105). Вып. 14. – С. 282–287.

2. Осиков М.В. Сравнительный анализ влияния светодиодных источников освещения на психофизиологический статус и адаптационные возможности волонтеров / М.В. Осиков, О.А. Гизингер, Л.Ф. Телешева, И.И. Долгушин, О.И. Огнева, А.А. Федосов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5.

3. Егорова Е.Ю. Концепция организации службы психолого-педагогического сопровождения, адаптации и сохранения психического здоровья в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана [Електронний ресурс] / Е.Ю. Егорова // Гуманитарный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – Вып. 11. – Режим доступу : http://hmbul.bmstu.ru/catalog/prmed/hidden/133.html.

4. Голуб Я.В. Медико-психологические аспекты применения свето-звуковой стимуляции и биологически обратной связи / Голуб Я.В., Жиров В.М. – СПб: КЕРИ, 2007. – 100 с.

5. Оценка функционального состояния организма спасателя [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk-cert.ru/news/otsenka_funktionalnogo_sostoyanya_organizma_spasatelya/

6. Оценка функционального состояния организма человека : в 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы : учеб. пособие / С. Э. Мурик. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 159 с.

7. Функциональные состояния человека [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://works.doklad.ru/view/n7DAUk6ZuOg/all.html

8. Тема 3. Функциональные состояния человека в труде [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.uhlib.ru/psihologija/psihologija_truda_konspekt_lekcii/p5.php

9. Факторы, определяющие развитие эмоциональных состояний [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://studopedia.su/15_19613_konfliktnie-emotsionalnie-sostoyaniya-

10. Райгородский Д.Я. Практическая психодиагностика. Методики и тесты : учебное пособие / под ред. Д.Я. Райгородского. – Самара : Бахрах-М, 2001. – 672 с. – ISBN 5-89570-005-5.

11. Расчет уровня физического состояния [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://mestasily.org/raschet-urovenya-fizicheskogo-sostoyaniya/

**References**

1. Pyatakovich F.A. Biotehnicheskaya sistema multiparametricheskogo igrovogo treninga, napravlennaya na modifikaciyu funkcionalnogo sostoyaniya cheloveka / F.A. Pyatakovich, M.A. Surushkin, T.I. Yakunchenko i dr. ; NIU BelGU // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Medicina. Farmaciya. – 2011. – № 10(105). Vyp. 14. – S. 282–287.

2. Osikov M.V. Sravnitelnyj analiz vliyaniya svetodiodnyh istochnikov osvesheniya na psihofiziologicheskij status i adaptacionnye vozmozhnosti volonterov / M.V. Osikov, O.A. Gizinger, L.F. Telesheva, I.I. Dolgushin, O.I. Ogneva, A.A. Fedosov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 5.

3. Egorova E.Yu. Koncepciya organizacii sluzhby psihologo-pedagogicheskogo soprovozhdeniya, adaptacii i sohraneniya psihicheskogo zdorovya v uchebnom processe MGTU im. N.E. Baumana [Elektronnij resurs] / E.Yu. Egorova // Gumanitarnyj vestnik MGTU im. N.E. Baumana. – 2013. – Vyp. 11. – Rezhim dostupu : http://hmbul.bmstu.ru/catalog/prmed/hidden/133.html.

4. Golub Ya.V. Mediko-psihologicheskie aspekty primeneniya sveto-zvukovoj stimulyacii i biologicheski obratnoj svyazi / Golub Ya.V., Zhirov V.M. – SPb: KERI, 2007. – 100 s.

5. Ocenka funkcionalnogo sostoyaniya organizma spasatelya [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://uk-cert.ru/news/otsenka_funktionalnogo_sostoyanya_organizma_spasatelya/

6. Ocenka funkcionalnogo sostoyaniya organizma cheloveka : v 2 ch. Ch. 1. Teoreticheskie osnovy : ucheb. posobie / S. E. Murik. – Irkutsk : Izd-vo IGU, 2013. – 159 s.

7. Funkcionalnye sostoyaniya cheloveka [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://works.doklad.ru/view/n7DAUk6ZuOg/all.html

8. Tema 3. Funkcionalnye sostoyaniya cheloveka v trude [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.uhlib.ru/psihologija/psihologija_truda_konspekt_lekcii/p5.php

9. Faktory, opredelyayushie razvitie emocionalnyh sostoyanij [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://studopedia.su/15_19613_konfliktnie-emotsionalnie-sostoyaniya-

10. Rajgorodskij D.Ya. Prakticheskaya psihodiagnostika. Metodiki i testy : uchebnoe posobie / pod red. D.Ya. Rajgorodskogo. – Samara : Bahrah-M, 2001. – 672 s. – ISBN 5-89570-005-5.

11. Raschet urovnya fizicheskogo sostoyaniya [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://mestasily.org/raschet-urovenya-fizicheskogo-sostoyaniya/

Рецензія/Peer review : 6.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-169-175
УДК 528.563

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
О.В. ПЕТРЕНКО, М.В. ІЛЬЧЕНКО
Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»

# ІНТЕГРУЮЧИЙ РЕЖИМ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ РЕЗОНАТОРОМ

*Коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ) є одним із останніх найдосконаліших приладів, що відноситься до гіроскопічних технологій. Ця технологія за достатньо короткий час розповсюдилася по всьому світу не тільки тому, що продемонструвала якості, що відсутні у інших конкуруючих, в основному оптичних технологій (волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) та кільцевих лазерних гіроскопах (КЛГ)), але і тому, що технологія КВГ, на відміну від ВОГ та КЛГ, піддається мікромініатюризації. Це призвело до створення мікромеханічних гіроскопів (МЕМС гіроскопів). В роботі наведено режими КВГ, в яких він може використовуватись: 1. Режим роботи без зворотного зв'язку, коли хвиля, збуджена силами Коріоліса, амплітуда якої пропорційна вимірюваній кутовій швидкості, не керується. При обертанні кут повороту хвилі пропорційний кутовій швидкості обертання. 2. Режим роботи зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силами Коріоліса. У цьому випадку сигнал зворотного зв'язку пропорційний вимірюваній кутовій швидкості. 3. Диференціальний режим роботи, коли зворотні зв'язки, компенсуючі Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. У цьому випадку виникають два сигнали, в яких кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки, рівні в обох сигналах. Додатково розглянуто режим роботи Коріолісового вібраційного гіроскопа в якості датчика кута. На основі узагальненої математичної моделі КВГ, розроблено структурну схему системи керування, що забезпечує роботу вібраційного гіроскопа в інтегруючому режимі, коли КВГ вимірює кут повороту в інерціальному просторі. Структурна схема реалізована в Matlab-Simulink і представлена результатами моделювання як вихідного сигналу інтегруючого КВГ, так і траєкторії руху матеріальної точки на резонаторі.*

*Ключові слова: вібраційний гіроскоп, резонатор, математична модель.*

E.N. BEZVESILNA
National Technical University of Ukraine «Kyiv polytechnic institute of the name Igor Sikorsksi»
O.V. PETRENKO, M.V. ILCHENKO
Pablic joint stock company «Research-and-Production association «Kyiv avtomatics plant»

## THE INTEGRATING MODE OF OSCILLATION GYROSCOPE IS WITH A METALLIC CYLINDRICAL RESONATOR

*The Coriolis oscillation gyroscope (KVG) is one of the last most perfect devices, that behaves to gyroscopic technologies. This technology for short enough time spread all over the world not only because showed qualities, that absent at other competitive, mainly optical, technologies (fiber-optic gyroscopes (VOG) and circular laser gyroscopes (KLG)), but also because technology of KVG, unlike VOG and KLG, is added a miniaturization. It resulted in creation. The modes of KVG, which he can be used in, are in-process resulted: 1. Office hours nonreactive, when a wave, excited forces of Coriolis, amplitude of which is proportional a measureable angulator, does not follow. At a rotation, the corner of turn of wave is proportional the angulator of rotation. 2. There are office hours ticker-coil, which compensates a wave, excited forces of Coriolis. In this case the signal of feed-back is proportional a measureable angulator. 3. Differential office hours, when reverse copulas, compensating the Coriolis wave, are kept, and additionally set the signal of management proposes an oscillation wave between electrodes. In this case there are two signals, which an angulator which is measured is in, there is their difference with opposite signs doubles the signal of angulator and compensates errors, levels in both signals. The mode of operations of the Coriolis oscillation gyroscope is additionally considered in quality the sensor of corner. On the basis of the generalized mathematical model of KVG, the flow diagram of control system, which provides work of oscillation gyroscope in the integrating mode is developed, when KVG measures the corner of turn in inertial space. A flow diagram is realized in Matlab-simulink and presented the results of design of both initial signal of integrating KVG and trajectory of motion of financial point, on a resonator.*

*Keywords: oscillation gyroscope, resonator, mathematical model.*

### Вступ

КВГ є одним із найбільш досконалих приладів останніх гіроскопічних технологій. Ця технологія за достатньо короткий час розповсюдилася по всьому світу не тільки тому, що продемонструвала якості, що відсутні у інших конкуруючих, в основному оптичних технологій (волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) та кільцевих лазерних гіроскопів (КЛГ)), але і тому, що технологія КВГ, на відміну від ВОГ та КЛГ, піддається мікромініатюризації. Це привело до створення мікромеханічних гіроскопів (МЕМС гіроскопів).

Чутливий елемент (ЧЕ) КВГ може мати або вібруючу оболонку (на півсферу, циліндр, кільце та ін.) або вібруючу пробну масу (балку, камертон, спарений камертон та ін.).

Всі типи КВГ можуть працювати у різноманітних режимах:

1. Режим роботи без зворотного зв'язку, коли хвиля, збуджена силами Коріоліса, амплітуда якої пропорційна вимірюваній кутовій швидкості, не керується. При обертанні кут повороту хвилі пропорційний кутовій швидкості обертання.

2. Режим роботи зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силами Коріоліса. У цьому випадку сигнал зворотного зв'язку пропорційний вимірюваній кутовій швидкості.

3. Диференціальний режим роботи, коли зворотні зв'язки, компенсуючі коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. У цьому випадку виникають два сигнали, в яких кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки, рівні в обох сигналах.

4. Режим роботи з компенсацією тільки квадратурної компоненти сигналу (інтегруючий режим). В інтегруючому режимі роботи сили Коріоліса не компенсуються і в результаті накладання двох хвиль: первинної та вторинної, вібраційна стояча хвиля повертається вслід за обертанням корпусу КВГ із затримкою, що рівна коефіцієнту Брайанак $\approx 0{,}4$.

У перших трьох режимах КВГ вимірює кутову швидкість та є датчиком кутової швидкості. В четвертому режимі КВГ вимірює кут повороту та є інтегруючим гіроскопом.

**Експериментальна частина**

**1. Узагальнена модель КВГ.** Основні рівняння руху, які описують будь-який з існуючих режимів роботи КВГ і враховують всі головні його похибки називаються узагальненою моделлю КВГ і представляються у вигляді [1]:

$$-k\left(2\Omega\dot{y}+\dot{\Omega}y\right)+\frac{2}{\tau}\dot{x}+\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\left(\dot{x}cos2\theta_\tau+\dot{y}sin2\theta_\tau\right)+\left(\omega^2-k'\Omega^2\right)x-\omega\Delta\omega\left(xcos2\theta_\omega+ysin2\theta_\omega\right)=f_x;$$

$$+k\left(2\Omega\dot{x}+\dot{\Omega}x\right)+\frac{2}{\tau}\dot{y}-\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\left(-\dot{x}sin2\theta_\tau+\dot{y}cos2\theta_\tau\right)+\left(\omega^2-k'\Omega^2\right)y+\omega\Delta\omega\left(-xsin2\theta_\omega+ycos2\theta_\omega\right)=f_y, \quad (1)$$

де $\omega^2=\frac{\omega_1^2+\omega_2^2}{2}$; $\omega\Delta\omega=\frac{\omega_1^2-\omega_2^2}{2}$; $\frac{1}{\tau}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_1}+\frac{1}{\tau_2}\right)$; $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)=\frac{1}{\tau_1}-\frac{1}{\tau_2}$.

У цих рівняннях, які описують коливання первинної моди по осі *X* і вторинної моди по осі *Y*, називаються рівняннями у швидких змінних, так як відхилення *x* та *y* від рівноважного положення резонатора по обох координатах відбуваються з частотою, близькою до резонансної. У цих рівняннях враховано, що в резонаторі є дві осі з максимальною $\omega_1$ і мінімальної $\omega_2$ резонансними частотами коливань. Також, є дві осі з мінімальним $\tau_1$ і максимальним $\tau_2$ часом загасання вільних коливань, що еквівалентно мінімальної $Q_1$ і максимальної $Q_2$ добротності резонатора, так як $\tau = 2Q / \omega$. Причому, вісь мінімальної резонансної частоти має кут $\theta_\omega$ з напрямком первинних коливань, а вісь мінімальної добротності становить кут $\theta_\tau$ з напрямком первинних коливань, як показано на рис. 1.

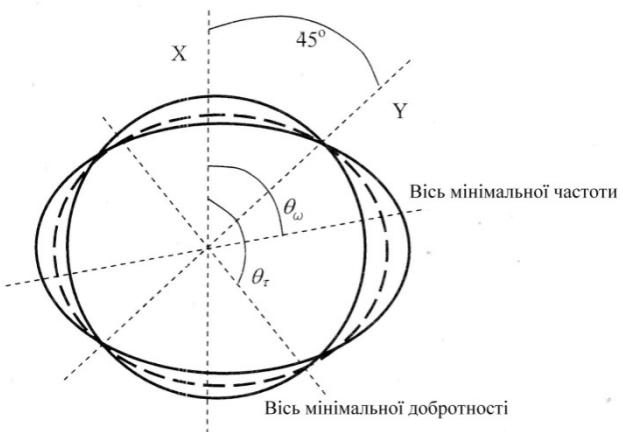



**Рис. 1. Кути мінімальної частоти та добротності**

У рівняннях (1) передбачені керуючі силові дії $f_x$ та $f_y$ по кожній з осей *X* і *Y* коливань. Крім того, враховуються члени, обумовлені наявністю кутового прискорення $\dot{\Omega}$ і доцентрового прискорення $\Omega^2$, які при побудові системи керування хвилею не враховуються (у зв'язку з їх малістю). Дійсно, $\dot{\Omega}x$ менше, ніж $\dot{x}\Omega$ у стільки разів, у скільки резонансна частота більше частоти зміни вимірюваної кутової швидкості, зазвичай приблизно в 40-50 разів, а $\Omega^2$ менше $\omega^2$ приблизно в $10^4$ разів.

Рівняння (1) запишемо в наступному вигляді:

$$\ddot{x}-2k\Omega\dot{y}+d_{xx}\dot{x}+d_{xy}\dot{y}+k_{xx}x+k_{xy}y=f_x;$$

$$\ddot{y}+2k\Omega\dot{x}+d_{yx}\dot{x}+d_{yy}\dot{y}+k_{yx}x+k_{yy}y=f_y, \quad (2)$$

де $k$ – коефіцієнт Брайана, $d_{xx}=2/\tau+\Delta(1/\tau)cos2\theta_\tau$ – коефіцієнт демпфування коливань по осі *X*, $d_{xy}=\Delta(1/\tau)sin2\theta_\tau$ – перехресне демпфування, $k_{xx}=\omega_1^2-\omega\Delta\omega cos2\theta_\omega$ – нормована на масу жорсткість

резонатора по осі *X*, $k_{xy} = -\omega\Delta\omega sin2\theta_\omega$ – перехресна жорсткість, $d_{yx} = d_{xy}$, $d_{yy} = 2/\tau - \Delta(1/\tau)cos2\theta_\tau$ – коефіцієнт демпфування коливань по осі *Y*, $k_{yx} = k_{xy}$, $k_{yy} = \omega_2^2 + \omega\Delta\omega cos2\theta_\omega$ – нормована на масу жорсткість резонатора по осі *Y*.

У інтегруючому режимі роботи КВГ сила Коріоліса, яка виникає внаслідок обертання вібраційної структури, не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. На будь-якому часовому інтервалі кут повороту хвилі пропорційний куту повороту резонатора (а разом з ним і всього гіроскопа) відносно інерційного простору.

При відсутності зовнішніх сил $f_x = f_y = 0$ і демпфування $d_{xx} = d_{yy} = d_{yx} = 0$, рівняння (2) має наступний вигляд [2]:

$$y = asin\left(\theta_0 - k\int_t^{t_0}\Omega\left(t'\right)dt'\right)\cos\left(\omega t + \varphi'\right) - qsin\left(\theta_0 - k\int_t^{t_0}\Omega\left(t'\right)dt'\right)\sin\left(\omega t + \varphi'\right);$$

$$x = acos\left(\theta_0 - k\int_t^{t_0}\Omega\left(t'\right)dt'\right)\cos\left(\omega t + \varphi'\right) - qsin\left(\theta_0 - k\int_t^{t_0}\Omega\left(t'\right)dt'\right)\sin\left(\omega t + \varphi'\right). \quad (3)$$

Рівняння (3) показують, що під час відсутності зовнішніх сил і демпфування траєкторія руху матеріальної точки резонатора в процесі коливань обертається при обертанні резонатора з кутовою швидкістю $\Omega$ з відставанням по куту на коефіцієнт Брайана. Коефіцієнт Брайана для циліндра можна визначити точніше за формулою [3]:

$$k = \frac{n}{n^2 + 1 + \frac{3}{n^2}\left(\frac{r}{h}\right)^2}, \quad (4)$$

де $n$ – номер моди коливань, $n$ =2, $r$ – радіус циліндра, $h$ – висота циліндра.

Для циліндра діаметром 25 мм та висотою $h$ = 18 мм, $k$ = 0,373.

**2. Структурна схема інтегруючого КВГ.** За відсутності кутової швидкості $\Omega$ траєкторія руху матеріальної точки є еліпс. При обертанні гіроскопа з кутовий швидкістю $\Omega$ еліпс повертається у бік обертання. Якщо гіроскоп повернувся, наприклад, на 90º, то хвиля (велика вісь еліпса) повернеться на кут $\theta$ = k · 90 ° = 0,373 · 90 ° = 33,57º. Графік траєкторії точки в процесі коливань резонатора представлена на рис. 2.

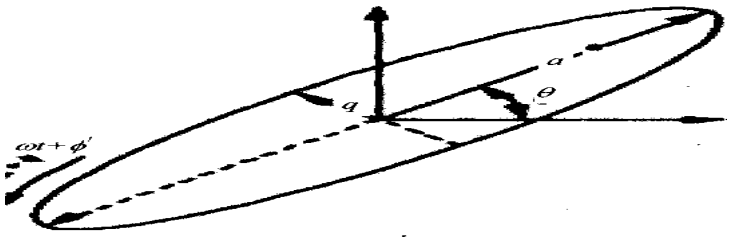



**Рис. 2. Траєкторія точки в процесі коливань**

При відсутності зовнішніх сил та демпфування і коли частоти двох хвиль однакові – параметри *a, q, $\theta_0$, $\varphi$* є константами, КВГ є ідеальним гіроскопом [3]. Різниця власних частот коливань, демпфування, зовнішні сили призводять до того, що параметри *a, q, $\theta_0$, $\varphi$* змінюються з часом. Ця зміна в часі відбувається значно повільніше, ніж період швидких коливань T = 2π / ω.

Для керування хвилею КВГ повинні бути прикладені сили, які змінюються з частотами, близькими або рівними резонансній частоті і мають відповідну фазу. Для цього потрібний генератор опорної фази. Генератор опорної фази виробляє сигнали, що забезпечують прикладання сил необхідної частоти і фази, а також опорні сигнали для модуляції та демодуляції. Саме по демодульованим вихідним сигналам обчислюються оцінки параметрів *a, q, $\theta_0$, $\varphi$*.

Для того, щоб отримати прийнятну точність вимірювання кутової швидкості або кута повороту, у всіх КВГ незалежно від режимів роботи необхідний контур керування амплітудою.

У КВГ більш високої точності необхідно компенсувати величину *q* – квадратуру, зводячи її до нуля. Цей сигнал називається квадратурою, так як його фаза відрізняється від фази основного сигналу, пропорційного кутовій швидкості, на 90º.

Параметри *a, q, $\theta_0$, $\varphi$* можна визначити через демодуляційні змінні $C_x$, $S_x$, $C_y$, $S_y$. Співвідношення, що пов'язують демодуляційні змінні з параметрами траєкторії, визначаються наступними виразами [1]:

$$a=\sqrt{\frac{1}{2}(E+\sqrt{E^2-Q^2})}\ ;\quad q=\sqrt{\frac{1}{2}(E-\sqrt{E^2-Q^2})}\ ;$$

$$E=C_x^2+S_x^2+C_y^2+S_y^2\ ;\quad Q=2(C_xS_y-C_yS_x) \tag{5}$$

$$\theta=\frac{1}{2}arctan\frac{2(C_xC_y+S_xS_y)}{C_x^2+S_x^2-C_y^2-S_y^2}\ ;\quad \varphi=\frac{1}{2}arctan\frac{C_xS_x+C_yS_y}{C_x^2-S_x^2+C_y^2-S_y^2}\ .$$

Мета системи керування КВГ, що працює в інтегруючому режимі, полягає в забезпеченні наступних значень параметрів $a$, $q$, $\theta_0$, $\varphi$ в процесі роботи гіроскопа:

$$q=0\ (Q=0),\ a^2=E=const\ ,\ \varphi=0; \tag{6}$$

Структурна схема системи керування інтегруючого варіанта КВГ представлена на рис. 3.

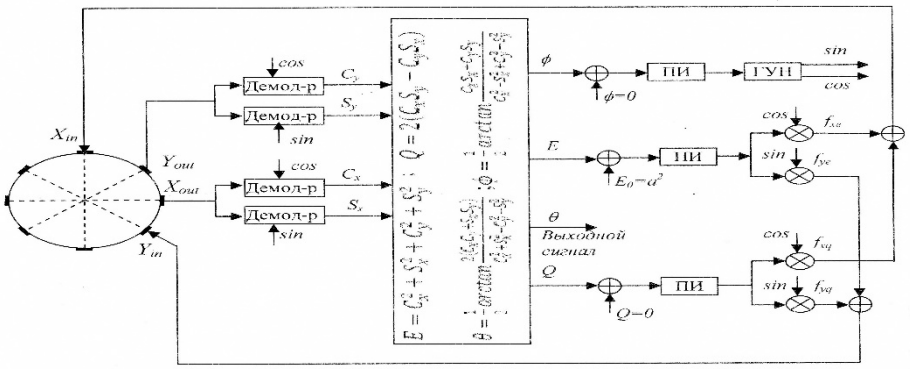



**Рис. 3. Структурна схема системи керування інтегруючого КВГ**

4. **Simulink-модель інтегруючого КВГ.** На основі структурної схеми, представленої на рис. 3, а також використовуючи Simulink-модель КВГ, що працює в режимі датчика кутової швидкості (ДКШ), представленої в роботі [4], побудована Matlab-Simulink модель інтегруючого КВГ, яка представлена на рис. 4.

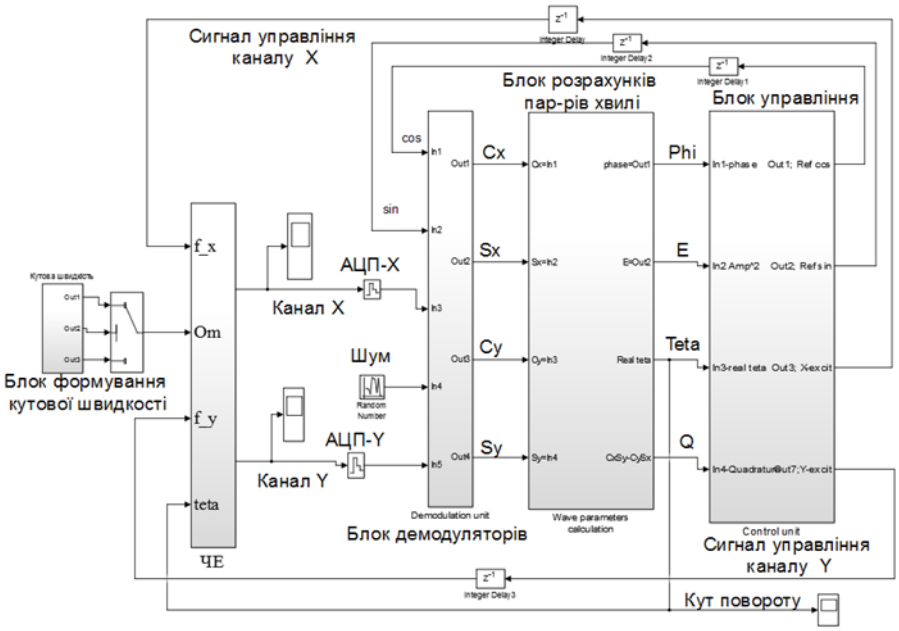



**Рис. 4. Matlab-Simulink модель інтегруючого КВГ**

Модель складається з 5-и блоків:

1. Блок формування кутової швидкості, що забезпечує перемикання з нульовою або постійної кутової швидкості на змінну кутову швидкість. При нульовій кутової швидкості на вході моделі спостерігається сигнал зміщення нуля.

2. З блоку формування кутової швидкості сигнал надходить на вхід Om чутливого елемента (ЧЕ), два виходи якого формують вимірювальні канали $X$ та $Y$ відповідно до рішень рівнянь (1). У модель блоку ЧЕ, також вводяться такі параметри резонатора, як резонансна частота, добротність, різночастотність, різнодобротність, кути $\theta_\tau$ і $\theta_\omega$. З двох виходів ЧЕ сигнали надходять на АЦП вимірювальних каналів $X$ та $Y$ і далі у цифровій формі надходять на блок демодуляторів.

3. Блок демодуляторів працює відповідно до структурної схеми, представленої на рис.3, тобто за допомогою опорних сигналів $\sin\omega_r t$ і $\cos\omega_r t$ резонансної частоти $\omega_r$ проводиться операція амплітудної демодуляції і формуються демодульовані змінні $C_x$, $S_x$, $C_y$, $S_y$, які надходять на блок обчислення параметрів хвилі.

4. Блок обчислення параметрів хвилі обчислює параметри $a$, $q$ $(Q)$, $\theta$, $\varphi$ та подає їх в блок керування.

5. Блок керування формує керуючі сигнали на електроди ЧЕ так, як показано на рис. 3.

Кут хвилі $\theta$ пропорційний куту повороту гіроскопа і являє собою вихідний сигнал інтегруючого режиму роботи КВГ. Цей сигнал формується на виході блоку обчислення параметрів хвилі і надходить на вихід гіроскопа, а також подається у блок керування для перерахунку керуючих сигналів $f_x$ та $f_y$ відповідно до зміненої орієнтацією хвилі щодо електродів керування хвилею.

Відмінність моделей КВГ, що реалізують різні режими роботи, полягає саме у побудові блоку керування хвилею.

Simulink-схема блоку керування хвилею інтегруючого КВГ представлена на рис. 5.

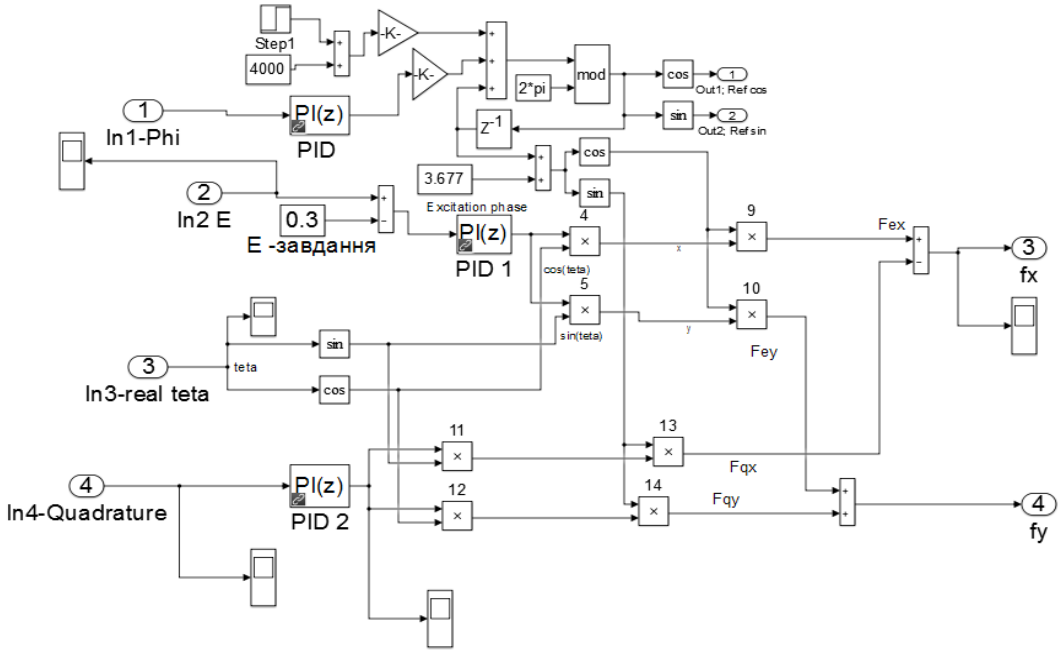



**Рис. 5. Simulink-схема блоку керування хвилею інтегруючого КВГ**

У цій блок-схемі, на відміну від блок-схем диференціального режиму і режиму ДКШ, використовуються 3 пропорційно-інтегруючі-диференціюючі (ПІД) регулятора для забезпечення бажаних значень параметрів хвилі $\varphi$, $E$, та $Q$, зазначених у виразах (6). Блок керування також формує опорні сигнали для модуляції сигналів керування і демодуляції виміряних сигналів.

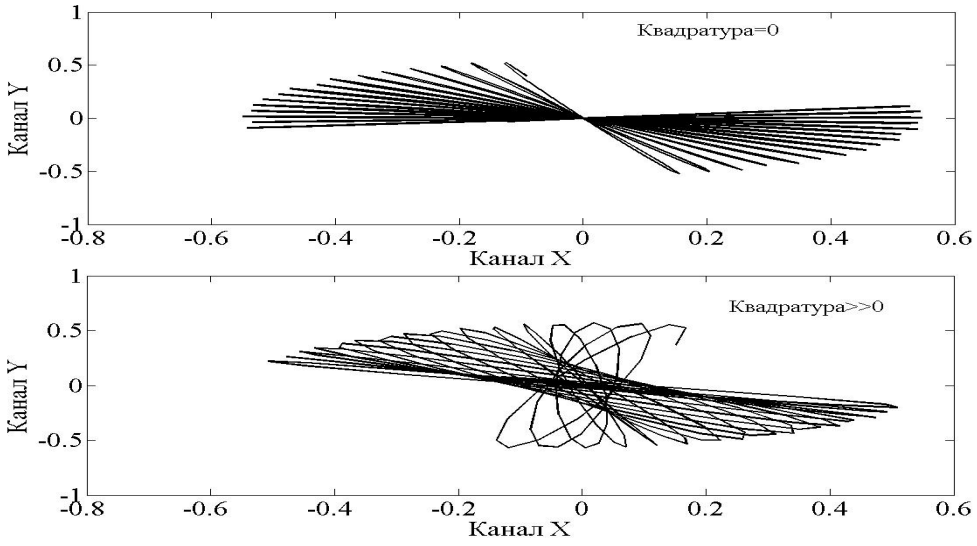



**Рис. 6. Траєкторія руху точки на резонаторі в ідеальному та реальному резонаторах**

**4. Результати моделювання.** При ідеальному кільцевому резонаторі, коли різночастотність дорівнює нулю, і, отже, квадратура $q = Q = 0$, траєкторія руху матеріальної точки на ободі резонатора в

процесі коливань резонатора є прямою лінією, що збігається з радіусом кільця. Орієнтація цієї траєкторії, залишаючись прямою лінією, змінюється, обертаючись навколо центру кільця. У реальному резонаторі, при наявності різночастотності, сигнал квадратури $Q \neq 0$ і траєкторія точки на резонаторі є еліпсом. Ці траєкторії в координатах $X$ та $Y$ при $Q = 0$ і $Q >> 0$ показані на рис. 6.

Коли КВГ працює в режимі датчика кутової швидкості (ДКШ), то кутова швидкість вимірюється і компенсується, При вимірюванні великих кутових швидкостей потрібно формувати значну напругу зворотного зв'язку. Наприклад, КВГ з металевим резонатором зазвичай має значення масштабного коефіцієнта на рівні 40 мВ/(град/с). При вимірюванні кутової швидкості $5 \cdot 10^3$ град/с, буде потрібна напруга зворотного зв'язку 200 В. У інтегруючому режимі КВГ, кутова швидкість не компенсується, тому можна працювати в малих напругах, вимірюючи великі кутові швидкості.

На рис. 7 представлено вимірювання кута інтегруючим КВГ, коли кутова швидкість дорівнює $5 \cdot 10^3$ град/с і має періодичний характер. Похибка вимірювання кута інтегруючим КВГ, обумовлена неідеальністю резонатора і має періодичний характер.

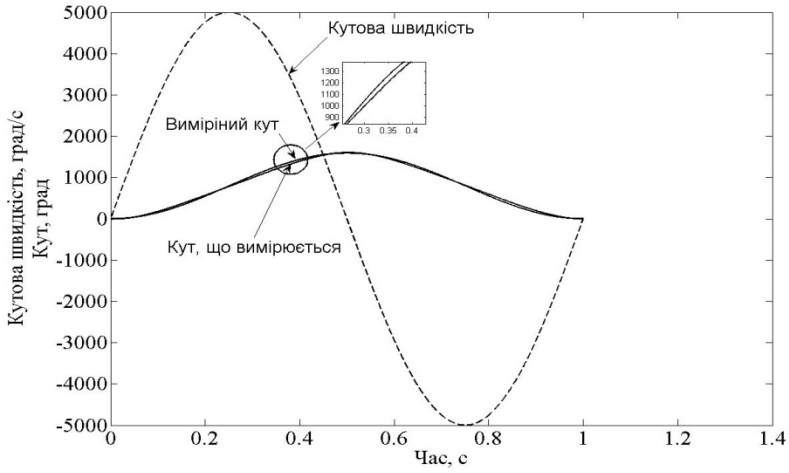



**Рис. 7. Результат вимірювання кута при кутовій швидкості $5 \cdot 10^3$ град/с**

Періодичний характер зміни похибки вимірювання кута інтегруючим КВГ добре видно на рис. 8, де представлені вимірювання кута при постійній кутовий швидкості обертання величиною 90 град/с для ідеального та реального (не ідеального) резонаторів.

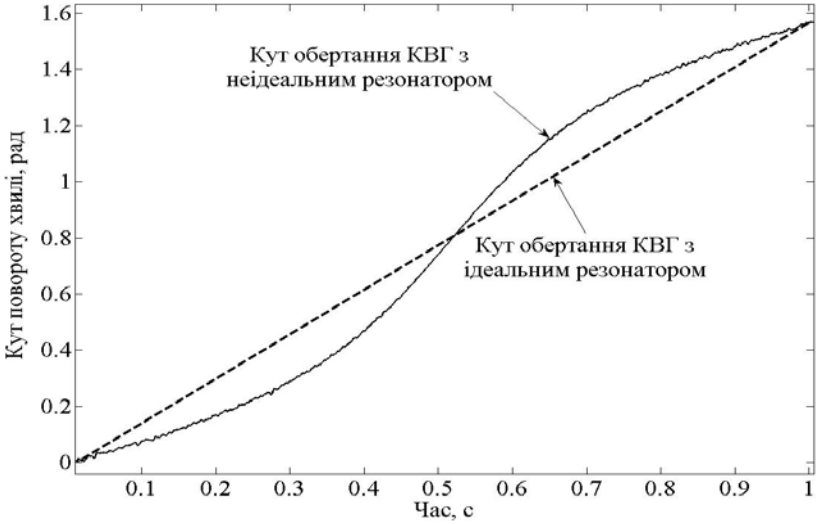



**Рис. 8. Вимірювання кута повороту КВГ при постійній кутовий швидкості обертання 90 град/с з ідеальним та не ідеальним резонаторами**

## Висновки

КВГ відрізняється від інших гіроскопів (наприклад, КЛГ та ВОГ) тим, що всі режими КВГ можуть бути реалізовані в одному цифровому варіанті КВГ з автоматичним перемиканням режимів. Це надає КВГ незаперечні переваги перед іншими гіроскопічними технологіями у частині діапазону кутових швидкостей, динамічної похибки при вимірюванні великих кутових швидкостей, шумів при вимірюванні малих кутових швидкостей, а також надійності [5]. Наприклад, при вимірюванні малих кутових швидкостей доцільно працювати в режимі 2, а при збільшенні вимірюваної швидкості і частоти її зміни, щоб зменшити динамічну похибку, слід перейти на режим 4. У разі виникнення надтраєкторії руху високих віброударних прискорень

слід перейти на режим 3 [6]. Один з варіантів реалізації КВГ з перемикання режимів 2 → 4 і назад, представлений в [7]. Похибка вимірювання кута в режимі 4 носить періодичний характер.

**Література**

1. Lynch Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging, Proc. 2nd St. Petersburg Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation, St. Petersburg, Russia, May 24-25, 1995.

2. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.1431™. 2004.

3. Матвеев В.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах / В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб. – М. : Физматлит, 2008.

4. Chikovani V. V., Tsiruk H. V. Digital Rate MEMS Vibratory Gyroscope Modeling, Tuning and Simulation Results. An International Journal of Computing Science and Applications (Computación y Sistemas), v. 21, No. 1, 2017, p. 147–159, doi: 10.13053/CyS-21-1-2497.

5. Чиковани В.В. Методика и расчет среднего времени наработки на отказ по результатам испытаний кориолисового вибрационного гироскопа / В.В. Чиковани, С.П. Маляров // Військового-технічний збірник. – Л. : Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного. – 2011. – № 2 (5).

6. Valerii V. Chikovani, Olha A. Sushchenko, Hanna V. Tsiruk External Disturbances Rejection by Differential Single-Mass Vibratory Gyroscope. Acta Polytechnica Hungarica, 2017, vol. 14, 3, pp. 251–270.

7. Lynch D.D., Matthews A. Dual Mode Hemispherical Resonator Gyro Operating Characteristics. 3-rd St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, part 1, p. 37–44, 1996.

**References**

1. Lynch Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging, Proc. 2nd St. Petersburg Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation, St. Petersburg, Russia, May 24-25, 1995.

2. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.1431TM. 2004.

3. Matveev B.A. Navyhatsyonnye systemy na volnovykh tverdotelnykh hyroskopakh / B.A. Matveev, B.S. Lunyn, M.A. Basarab. – M. : Fyzmatlyt, 2008.

4. Chikovani V. V., Tsiruk H. V. Digital Rate MEMS Vibratory Gyroscope Modeling, Tuning and Simulation Results. An International Journal of Computing Science and Applications (Computación y Sistemas), v. 21, No. 1, 2017, p. 147–159, doi: 10.13053/CyS-21-1-2497.

5. Chykovany V.V. Metodyka y raschet sredneho vremeny narabotky na otkaz po rezultatam yspытanyi koryolysovoho vybratsyonnoho hyroskopa / V.V. Chykovany, S.P. Maliarov // Viiskoho-tekhnichnyi zbirnyk. – L. : Akademiia sukhoputnykh viisk im. P. Sahaidachnoho. – 2011. – № 2 (5).

6. Valerii V. Chikovani, Olha A. Sushchenko, Hanna V. Tsiruk External Disturbances Rejection by Differential Single-Mass Vibratory Gyroscope. Acta Polytechnica Hungarica, 2017, vol. 14, 3, pp. 251–270.

7. Lynch D.D., Matthews A. Dual Mode Hemispherical Resonator Gyro Operating Characteristics. 3-rd St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, part 1, p. 37–44, 1996.

Рецензія/Peer review : 19.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Киричук

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-176-191
УДК 006.90.01.39:681.2

В.Т. КОНДРАТОВ
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

# ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО.
## ЧАСТЬ 7. ИЗМЕРЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ЛАНДАУ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

*В работе рассмотрен метод измерения дискретных энергетических уровней Ландау исследуемых образцов материалов, описано несколько схемотехнических решений магнитополевых измерителей разной степени сложности — от простого до много-функционального. Приведены результаты экспериментальных исследований дискретных уровней Ландау. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитополевые методы и средства измерения физических величин.*

*Ключевые слова: метод измерения, магнитополевые измерители, уровень Ландау.*

V.T. KONDRATOV
V.M. Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**FUNDAMENTAL METROLOGY: THE MAGNETIC–FIELD THEORY OF MEASUREMENTS WITH USE THE PHENOMENON OF TRANSFER OF ENERGY AND INFORMATION THROUGH MATERIAL OR SUBSTANCE**
**PART 7. MEASUREMENT OF DISCRETE POWER *LANDAU LEVELS* UNDER NORMAL CONDITIONS CARRYING OUT OF MEASUREMENTS**

*The paper discusses the method of measuring the discrete Landau energy levels of the samples of materials under study and several circuit solutions for magnetic-field meters of varying degrees of complexity, from simple to multifunctional. It was established experimentally that for the implementation of the method, physical conditions must be created a priori, in which, first of all, the laws of conservation of mechanical and electromagnetic energy in the material and the law of Faraday electromagnetic induction that provide fundamental interactions of the high-frequency solenoidal pulse magnetic field with the electrons of the material under investigation. It has also been established that for the transfer of the energy of the Landau discrete energy level to an adequate energy of a radio pulse, it is necessary to create conditions for the release of the energy of electrons during their abrupt transition from one energy level to another. The implementation of these conditions is ensured by manufacturing a closed-type monolithic flat two-circuit waveguide from the material under study, a transmitting antenna installed between the waveguide circuits, and cylindrical inductors that form a solenoidal vector field. It has been established that discrete Landau energy levels exist not only in metals, but also in dielectrics. This indicates that in dielectrics (in conditionally conducting and in weakly conducting material media) diamagnetism of transport electrons can be observed. Analytical expressions are obtained for the magnetic flux, the intensity of a high-frequency solenoidal pulsed magnetic field; The measurement equation for the n-th Landau energy level is obtained. A method has been developed and described that ensures the measurement of the discrete Landau energy levels of any macrocosm materials, moreover, under normal conditions of measurement. Experimentally obtained results confirmed the equidistance of Landau discrete energy levels. Almost 4-5 and even 6 emissions of radio pulses are observed. The envelopes of the Landau levels are cubic or quadratic in nature and are downward in a given system of scales. The paper lists the conditions for the practical implementation of the magnetic field method for measuring the discrete Landau energy levels of the macroscopic materials. It is stated that the magnetic field level gauges of Dandau on microcontrollers are of the greatest interest. They provide the highest degree of automation of the measurement process and high measurement accuracy. The obtained results expand our understanding of the magnetic field methods and means of measuring the Landau level under normal conditions for carrying out these measurements. The paper is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying magnetic-fields methods and measuring instruments of level and energy of Fermi in a macrocosm.*

*Keywords: a measurement method, magnetic-field measuring instruments, level Landau.*

**Введение.** Данная статья является дальнейшим развитием магнитополевой теории измерений (МП ТИ), XXI век характеризуется критическим отношением ученых к достижениям в области физики и математики XX века. Учеными переосмысливаются теоретические и практические результаты, полученные маститыми учеными. На сегодняшний день установлено множество парадоксов в физике, электродинамике и в других науках. Не обошли стороной и теорию Ландау.

В [1] показано, что в работе Ландау много теоретических ошибок. Несмотря на это, общепринятая теория электронного газа металла в магнитном поле была признана и послужила основой для построения обширной и успешной области науки. Общепринятое мнение было основано на известном решении задачи о движении заряженной частицы (электронов) в однородном магнитном поле. На самом деле необходимо было решать задачу движения заряженных частиц под действием соленоидального импульсного магнитного поля (типа меандр), обеспечивающего прямолинейное движение электронов в «паузах» между импульсами.

В [1] отмечается ошибочность утверждение о том, что в плоскости, перпендикулярной полю, частица движется по фиксированной круговой орбите. Полагаем, что речь должна идти о векторе индукции соленоидального импульсного магнитного поля. В плоскости, перпендикулярной вектору индукции соленоидального импульсного магнитного поля, движущиеся электроны создают продольную высокочастотную электромагнитную волну, которая распространяется, согласно теореме Умова – Поинтинга, по замкнутому контуру не круговой, а произвольной, в общем случае, формы. Именно контур определяет траекторию движения электромагнитной волны как в пределах, так и вне действия импульсного

магнитного поля на физическую (материальную) систему замкнутого типа. Это подтверждается и наши экспериментальными исследованиями и измерениями уровней Ландау.

В квантовой статистической теории Ландау и в классической теории Бора принято, что газ однородно заполняет весь отведённый объём. В плоскости, перпендикулярной соленоидальному импульсному магнитному полю высокой частоты, электронный газ в состоянии равновесия имеет неоднородную плотность, убывающую с расстоянием от оси. Это подтверждается, например, магнитополевым эффектом удержания горячей плазмы от контакта с контуром СВЧ-печи, нагревательный элемент которой выполнен в виде катушки индуктивности параболического типа [2].

Согласно [1], аналитическое выражение для удельной диамагнитной восприимчивости электронного газа не является правильным. Оно не зависит от постоянной Планка, т.е. не описывает квантовый эффект, который не должен проявляться при $\hbar\hbar = 0$. Из упомянутого аналитического выражения Ландау следует, что свободный электронный газ должен быть парамагнитным. Это не соответствует эксперименту. Количественно сравнивать аналитическое выражение для удельной диамагнитной восприимчивости электронного газа с существующими результатами измерений магнитной восприимчивости невозможно, так как эти результаты сильно отличаются у разных авторов [1].

Выше сказанное свидетельствует о важности решения задачи измерения дискретных энергетических уровней Ландау с целью уточнения существующих теорий и разрешения парадоксов путем использования новых экспериментальных данных.

Объектом исследований являются магнитополевые методы и средства измерений.

Предметом исследований является описание сущности магнитополевого метода измерения (МП МИ) уровня Ландау и соответствующих схемотехнических решений магнитополевых измерителей.

***Результаты исследований***

1. Квантование, дискретные энергетические уровни Лпндау и их измерение

В квантовой механике «квантование Ландау» — это квантование циклотронных орбит заряженных частиц (электронов и др.) в магнитных полях [3], Квантование Ландау характеризует колебания электронных свойств материалов в зависимости от значения индукции приложенного магнитного поля.

Известно [4, 5], что заряженные частицы в постоянном магнитном поле вращаются по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля, или двигаются по винтовой линии, причём ось спирали параллельна оси магнитного поля. Частицы могут иметь какую угодно энергию; значения радиуса и шага спирали могут быть какими угодно.

В магнитном поле заряженные частицы, движущиеся в плоскости, перпендикулярной этому полю, могут занимать орбиты только с дискретными значениями энергии. Эти орбитальные энергетические уровни называются уровнями Ландау. Они впервые получены Л. Д. Ландау в 1930 году как решение уравнения Шрёдингера для заряженной частицы в присутствии магнитного поля. Его решением являются волновые функции электрона в гармоническом потенциале.

Несмотря на то, что движение частицы происходит в трёхмерном пространстве, ее энергетический спектр зависит только от двух квантовых чисел: непрерывного $k_z$ и дискретного $n$. Это означает, что спектр частицы является вырожденным [4]. В этой связи уровни Ландау также являются вырожденными. Количество электронов на уровне прямо пропорционально силе $F$ приложенного магнитного поля ($F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$, где $\alpha$ — угол между направлениями $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$; $q$ — заряд электрона; $v$ — скорость движения электрона; $B$ — индукция магнитного поля).

Существованием уровней Ландау объясняется диамагнетизм электронов проводимости в металлах и полупроводниках [6]. Этот эффект иначе известен как диамагнетизм Ландау. Наши исследования показали, что уровни Ландау существуют и в диэлектриках. Следовательно, в диэлектриках (в условно проводящих и в слабо проводящих материальных средах) наблюдается диамагнетизм электронов переноса (для металлов — это электроны проводимости).

Согласно классической механике, движение частицы с массой т и зарядом е в плоскости, перпендикулярной магнитному полю Н, представляет собой периодическое движение по окружности под действием силы Лоренца с круговой (циклотронной) частотой $\omega_c = |e| H/mc$ [5].

В квантовой механике такому финитному движению по окружности соответствуют движения с квантованными значениями энергии $E_n$, причем $E_n = (n + 1/k_2)\hbar\omega_c$, где п — квантовое число иди номер уровня Ландау; $k_2 = 2$. Это явление называется орбитальным квантованием.

Уровень Ландау связан с магнитной индукцией величиной [7]

$$S_l = |e|\hbar/mc = 1{,}16\cdot10^{-8}\ \text{эВ/Гс} = 1{,}16\cdot10^{-4}\ \text{эВ/Тл}, \quad (1)$$

представляющей собой крутизну преобразования напряженности магнитного поля в энергетический уровень. В этом случае энергия $n$-го уровня Ландау описывается уравнением величин

$$E_n = S_l(n + 1/k_2)H\ \text{эВ}. \quad (2)$$

Согласно (2), расстояние между уровнями Ландау, при заданных дискретных значениях $n$, зависит от напряженности $H$ магнитного поля ($\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu\mu_0$).

Полный макроскопический ток через некоторый контур L, выраженный через плотность тока $\mathbf{j}$ через любую поверхность S, натянутую на контур L , определяется равенством

$$\oint_L \mathbf{Hdl} = \oint_S \mathbf{jdS}\,, \tag{3}$$

где $\mathbf{dS} = \mathbf{n}dS$, а вектор $\mathbf{n}$ — единичный нормальный вектор к элементарной поверхности площадью dS.

Определим магнитную индукцию в соленоиде с линейной плотностью витков $n_в$ и силой тока $I_x$, при условии, что витки намотаны на сердечник с магнитной проницаемостью $\mu$. В этом случае циркуляция вектора напряженности магнитного поля $\boldsymbol{H}$ по контуру $L$ равна

$$\oint_L \mathbf{Hdl} = Hl_c\,. \tag{4}$$

Поскольку контур длиною $n_в l_c$ охватывает тот же суммарный ток $I_x$, то можно записать, что $\oint_L \mathbf{Hdl} = Hl_c = n_в l_c I_x$. При переменном токе (типа меандр) высокой частоты $\omega_0$ и амплитудой $I_m$, т.е. при

$$i_c(t) = I_m\left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1}\right],$$

где $k_1 = 1$, а $k_2 = 2$, $n$ — любое целое число от 1 до $N$ (число гармоник),

получим уравнение величин для напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты в виде

$$H_N(t) = n_в I_m\left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1}\right] \tag{5}$$

ампер-витков на метр за секунду.

Выражение (5) дает завышенные результаты, поскольку предполагает наличие бесконечно длинного соленоида, для которого $l_c \gg R$. Для полубесконечного соленоида напряженность импульсного магнитного поля высокой частоты

$$H_x = \frac{n_в}{k_2} I_m\left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1}\right]. \tag{6}$$

Подставив уравнение величин (6) в (2), получим уравнение измерений $n$-го энергетического уровня Ландау в виде

$$E_n(t) = S_l(n+1/k_2)\frac{n_в}{k_2} i(t)\ \text{эВ} = S_l(n+1/k_2)\frac{n_в}{k_2} I_m\left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1}\right]\text{эВ}\,. \tag{7}$$

или

$$E_n(t) = 5{,}8\cdot 10^{-5}(n+1/k_2) n_в l_c I_m\left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1}\right]\text{эВ}\,. \tag{8}$$

Известно [8], что внутри соленоида (рис. 1) напряженность магнитного поля значительно больше (примерно в $l_c^2 / R^2$ раз) напряженности вне него. Магнитное поле внутри соленоида является однородным всюду, кроме пространства вблизи концов, где оно ослабевает, а линии напряженности начинают расходиться. Вне соленоида напряженность поля при $l_c \gg R$ почти равна нулю. Указанная особенность соленоидов используется для получения однородных магнитных полей.

Определим напряженность магнитного поля внутри соленоида, выполненного из тонкого провода, намотанного плотно виток к витку на цилиндрический каркас при разных соотношениях длины $l_c$ и радиуса $R$ катушки индуктивности (рис. 1).

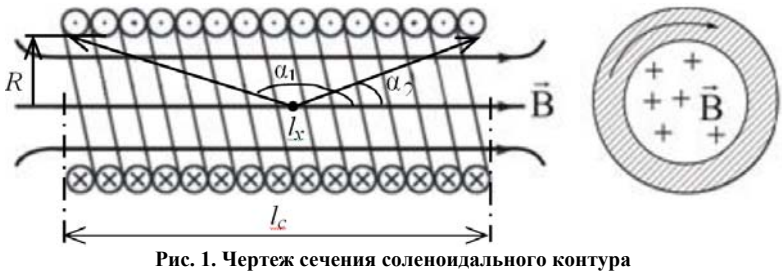



**Рис. 1. Чертеж сечения соленоидального контура**

Уравнение измерений напряженности магнитного поля соленоида можно получить на основании закона Био – Савара – Лапласа, как суперпозицию магнитных полей системы элементарных круговых токов.

С учетом графических построений, приведенных на рис. 1, напряженность магнитного поля в произвольной точке $l_x$ конечного соленоида с линейной плотностью витков $n_в$ и длиной $l_c$ определяется согласно уравнению величин [8, 9], но для тока типа меандр:

$$H_x(t)=\frac{n_в}{k_2}I_m\left(\frac{l_x}{\sqrt{R^2+l_x^2}}+\frac{l_c-l_x}{\sqrt{R^2+(l_c-l_x)^2}}\right)\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]=\frac{n_в}{k_2}I_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right](\cos\alpha_1-\cos\alpha_2), \quad (9)$$

С учетом (9), можно записать, что

$$E_n(t)=S_l(n+1/k_2)\frac{n_в}{k_2}I_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right](\cos\alpha_1-\cos\alpha_2)\ \text{эВ}. \quad (10)$$

Из выражения (9) следуют два частных случая:

1. Напряженность магнитного поля внутри соленоида в начале и в конце его оси, т.е. при $\{l_x\}=0$ и $l_x=l_c$ равна:

$$H_x=n_вI_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]\frac{l_x}{k_2\sqrt{R^2+l_x^2}}=\frac{n_в}{k_2}I_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right](\cos\alpha_1<\frac{n_в}{k_2}i_c(t). \quad (11)$$

Тогда

$$E_n(t)=S_l(n+1/k_2)\frac{n_в}{k_2}I_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]\cos\alpha_1\ \text{эВ}. \quad (12)$$

2. Напряженность поля внутри соленоида, в середине оси, т.е. при $l_x=l_c/k_2$, равна:

$$H_x(t)=n_вI_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]\left(\frac{l_x}{k_2\sqrt{R^2+(l_c/k_2)^2}}\right)<n_вi_c(t). \quad (13)$$

В этом случае уравнение измерений энергетического уровня Ландау имеет вид:

$$E_{L_n}(t)=S_l(n+1/k_2)n_вI_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]\frac{l_x}{k_2\sqrt{R^2+(l_c/k_2)^2}}\ \text{эВ}. \quad (14)$$

К сожалению, получаемые результаты определения напряженности магнитного поля соленоида оказываются несколько завышенными. Необходимо, чтобы значение энергетического уровня Ландау исследуемого образца материала было приведенным, согласно СИ, к единице пути (к 1 м) и к единице площади (к 1 м$^2$). В этом случае энергетический уровень Ландау определяется, при нормальных условиях выполнение измерений, согласно уравнению величин

$$E'_{L_n}(t)=S'_l(n+1/k_2)n_вI_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]\frac{l_x}{k_2\sqrt{R^2+(l_c/k_2)^2}}\ \text{эВ}, \quad (15)$$

где $S'_l=\frac{S_0}{S_x}\frac{l_0}{l_x}S_l$ — крутизна преобразования напряженности магнитного поля в энергетический уровень; $l_x$ — средняя длина замкнутого контура волновода по которому движутся электроны, м; $l_0$ — нормированная по значению длина контура волновода, равная 1 м; $S_0$ — нормированная по значению площадь поверхности материала волновода, на который действует магнитное поле, 1 м$^2$; $S_x$ — реальная площадь исследуемого материала волновода, м$^2$.

Для контроля магнитного потока в контуре весьма важно знать значение индуктивности соленоида. Индуктивность $L_c$ соленоида определяется на основе закона Био – Саварва – Лапласа, согласно которому между полным магнитным потоком $\Phi_x(t)$ и силой тока $I_x(t)$ существует линейная (прямо пропорциональная) зависимость:

$$\Phi_x(t)=L_cI_m\left[\frac{k_1}{k_2}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\sin(k_2n-k_1)\omega_0t}{k_2n-k_1}\right]. \quad (16)$$

Для однородного магнитного поля полный магнитный поток соленоида

$$\Phi_x(t)=B_x(t)S_кN_в=\mu_0\mu H_x(t)S_кN_в=\mu_0\mu H_x(t)S_кn_вl_c, \quad (17)$$

где $S_к$ — площадь витка соленоида ($S_к=\pi R^2$), а $H_x(t)$ определяется из выражения (9).

Поскольку напряженность магнитного поля соленоида зависит от координаты $l_x$ (рис. 1), то, как показано в [6], аналитическое выражение для магнитного потока выводится методом дифференцирования и

последующего интегрирования функции (16) по всей длине соленоида. В результате получают:

$$\Phi_x(t) = \int_0^{l_c} \mu_0 \mu H_x(t) S_к n_в dl_c = \mu_0 \mu S_к n_в^2 I_m \left( \sqrt{R^2 - l_c^2} - R \right) \left[ \frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N} \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (18)$$

Зная параметры соленоида, не сложно определить его индуктивность:

$$L_c = \mu_0 \mu S_к n_в^2 \left( \sqrt{R^2 - l_c^2} - R \right). \quad (19)$$

Из уравнения величин (19) видно, что индуктивность соленоида зависит не только от параметров (формы и размеров), но и от магнитных свойств окружающей среды. Нужно помнить, что если средой, заполняющей соленоид, является ферромагнетик, то индуктивность соленоида будет зависеть от силы тока, создающего магнитное поле в соленоиде, т.е. и от интенсивности намагничивания ферромагнетика.

В том случае, когда длина соленоида сравнима с его диаметром ($l_c \simeq k_2 R$), то индуктивность определяется согласно уравнению величин [10]:

$$L_c = \mu_0 \mu S_к n_в^2 \left( 1 - k_2^3 R / (k_2 + 1)\pi l_c \right). \quad (20)$$

Зная значение индуктивности, не сложно определить ЭДС самоиндукции по известному уравнению величин

$$\varepsilon = -L_c \frac{d[i_c(t)]}{dt} = -L_c I_m \frac{d}{dt} \left[ \frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N} \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (21)$$

На сегодняшний день отсутствуют приборы и методы измерения уровней Ландау. Ниже рассматриваются предложенные и описанные в работе [9] магнитополевые методы и измерители энергии дискретных энергетических уровней Ландау.

**2. Магнитополевой метод измерения энергии дискретных энергетических уровней Ландау**

В основу метода, как и других, описанных выше магнитополевых методов измерения физических величин, положен эффект силового воздействия вектора напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты на, прежде всего, отрицательно заряженные квазичастицы (электроны) исследуемого материала, приводящего как к высвобождению энергии электронов (в виде адекватной энергии радиоимпульса) при переходе с одного энергетического уровня на другой, так и к возникновению электродвижущей силы (ЭДС), пропорциональной энергии соответствующего уровня Ландау.

Метод разработан для измерения уровней Ландау любых материалов макромира и при нормальных условиях проведения измерений, не требующих сверхнизких температур.

От прямых измерений метод отличается тем, что для его осуществления априори создаются такие физические условия проведения измерений, при которых выполняются, прежде всего, законы сохранения механической и электромагнитной энергии в веществе, и закон электромагнитной индукции Фарадея, обеспечивающие фундаментальные взаимодействия импульсного магнитного поля с электронами исследуемого материала. Для реализации этих условий из исследуемого материала изготавливаются монолитный плоский двухконтурный волновод замкнутого типа и передающая антенна, а из диэлектрика — одну-две цилиндрические катушки индуктивностей, формирующие соленоидальное векторное поле.

Одновитковые колебательные контура выполняются идентичными по форме, по классу точности обработки поверхности, по размерам (площади поверхности и объема) и по значениям электрических параметров (индуктивности и собственной емкости). Антенна, как правило, выполняется априори в виде одного витка и с параметрами, идентичными параметрам одновитковых контуров волновода. На практике передающую антенну устанавливают на волновод путем использования механического соединения или пайки.

Контура плоского волновода и цилиндрические катушки индуктивности помещаются в магнитный экран, например, в ферритовые броневые сердечники. Антенна, естественно, не экранируется (рис. 2).

Сущность метода заключается в следующем. Вначале формируется соленоидальное импульсное магнитное поле высокой или сверхвысокой частоты. Для этого используется ток соответствующей частоты в виде прямоугольных импульсов (типа меандр). Данный ток пропускается, с низкой частотой коммутации, через соленоид с известными параметрами. В результате на торце соленоида формируется соленоидальное импульсное магнитное поле заданной частоты и напряженности.

Силовые линии напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты направляются перпендикулярно поверхности первого из двух плоских одновитковых контуров волновода (рис. 2).

Под действием указанного магнитного поля и сил Лоренца осуществляется колебательно-вращательно-поступательное движение электронов по замкнутому контуру волновода.

На рис. 2 сплошной линией со стрелками показано движение электронов слева на право через первый и второй плоские одновитковые колебательные контура, образующие большой замкнутый контур. Через передающую антенну электроны не проходят, поскольку движутся в противоположных направлениях (см. на рис. 2 стрелки по контуру передающей антенны).

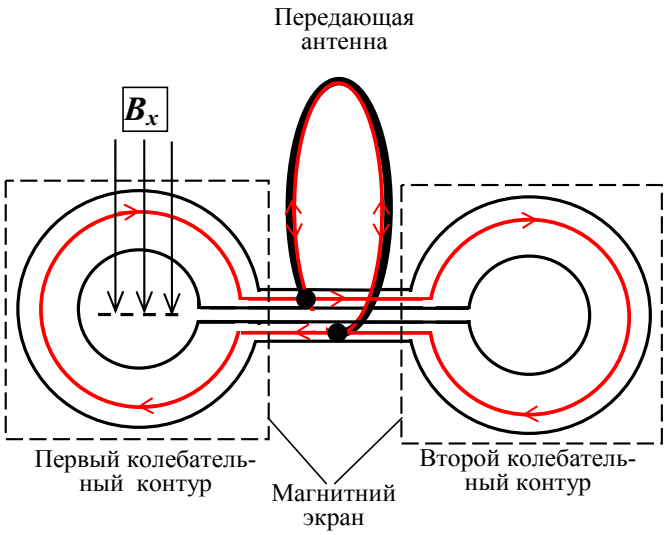



**Рис. 2. Графическое представление процесса передачи энергии по замкнутому контуру волновода**

Согласно [12], в современном понятии о орбитальной модели атома, электроны в атоме обладают только определенными значениями энергии, и переходят с одного энергетического уровня на другой только скачкообразно. Разница между энергетическими уровнями определяет частоту кванта света или высокочастотного радиоимпульса, который излучается или поглощается при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой. Каждой паре значений главного квантового числа $n$ и орбитального квантового числа $l$ соответствует определенный уровень энергии, которым может обладать электрон.

Для передачи энергии дискретного энергетического уровня Ландау в адекватную энергию радиоимпульса необходимо создать условия для высвобождения энергии электронов при скачкообразном переходе их с одного энергетического уровня на другой.

Физически эти условия обеспечиваются путем подключения передающей антенны. Антенна располагается перпендикулярно плоскости поверхности волновода замкнутого типа и только в геометрическом центре соединения первого и второго одновитковых контуров. В этом центре имеет место наибольшая плотность энергии электрического поля (рис. 2, рис. 3).

Для получения информации об уровнях Ландау, скачкообразно, шаг за шагом, осуществляется изменение напряженности соленоидального импульсного магнитного поля на заданные дискретные значения до определенного момента времени, при котором происходит мгновенный переход электронов с одного энергетического уровня Ландау на другой. В результате формируется радиоимпульс, который, с помощью антенны, передается (излучается) в открытое пространство.

Физически процесс излучения радиоимпульсов объясняется графическим изображением, приведенным на рис. 3 в виде линии со стрелками. В момент мгновенного перехода электронов с одного дискретного энергетического уровня Ландау на другой прекращается действие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на первый одновитковый колебательный контур волновода (сравни рис. 2 и рис. 3).

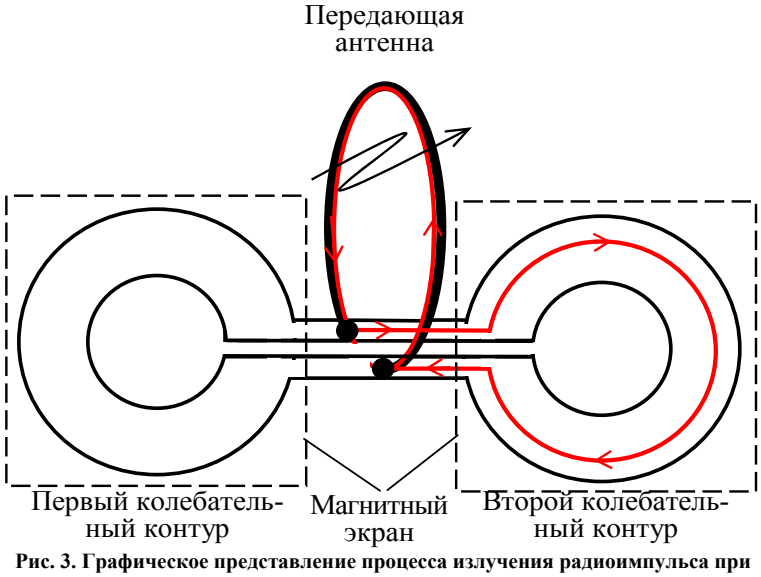



**Рис. 3. Графическое представление процесса излучения радиоимпульса при переходе отрицательно заряженных квазичастиц с одного энергетического уровня Ландау на второй и мгновенном прекращении действия импульсного магнитного поля на левый одновитковый контур волновода**

Накопленная во втором одновитковом колебательном контуре энергия электромагнитного поля мгновенно поступает в передающую антенну (рис. 3). На рис. 3 линия со стрелками показывает прохождение электронов через второй одновитковый колебательный контур в передающую антенну. В антенне генерируются ограниченные во времени затухающие колебания высокой частоты в виде радиоимпульса, длительность которого обусловлена полосой пропускания передающей антенны, ограничивающей количество волн высокочастотных колебаний тока в данном контуре, параметры которого, как было отмечено выше, установлены идентичными параметрам первого или второго контура волновода.

Следует отметить, что энергия (мощность) радиоимпульса зависит от разности энергий указанных дискретных энергетических уровней Ландау и, соответственно, от числа (и энергии) электронов в них, а также от омических потерь в антенне, от наводок внешних полей и от потерь на излучение,

Мгновенный переход отрицательно заряженных квазичастиц с одной дискретного энергетического уровня Ландау на другой осуществляется в определенные моменты времени, в которые дискретное уменьшение или увеличение напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты превышает определенный порог действия силовых линий импульсного магнитного поля.

Излучаемые радиоимпульсы принимаются антенной Ант 2 и поступают, например, на анализатор спектра АС (рис. 4). С помощью последнего определяются параметры радиоимпульса, переданного в определенный момент времени.

Для получения удобного для измерений и контроля электрического сигнала, несущего информацию о дискретном энергетическом уровне Ландау, используется вторая катушка индуктивности $L2$ (рис. 4).

Через волновод ВВ катушки индуктивности $L1$ и $L2$ связаны между собой с помощью индуктивных и емкостных связей (рис. 4, контура $L1$ и $L3$, $L2$ и $L4$. Благодаря этим связям, во втором (приемном) высокочастотном колебательном контуре наводится высокочастотная электродвижущая сила (ЭДС) с амплитудой, пропорциональной энергии дискретного энергетического уровня Ландау. При необходимости полученный высокочастотный сигнал трансформируется с априори заданным коэффициентом трансформации или усиливается с помощью усилителя.

Сигнал $u_{Li}(t)$ с выхода колебательного контура $L2$ поступает на измеритель среднего значения ИН (рис. 4), где выпрямляется с помощью, например, однополупериодного выпрямителя, усредняется (фильтруется) на RC-нагрузке и измеряется. Математически процесс получения среднего значения напряжения описывается уравнением величин:

$$U_{\text{ср}n} = \frac{R_{\text{н}}}{T'_{\text{к}}} \int_0^{T'_{\text{к}}} \left| i_{n\text{к}2}(t) \right| dt = \frac{k_1}{T'_{\text{к}}} \int_0^{T'_{\text{к}}} \left| u_{L_n}(t) \right| dt = S_{\text{п}1} E'_{L_n}, \qquad (22)$$

где $T'_{\text{к}} = nT_{\text{к}}$ — время интегрирования кратное периоду частоты коммутации ($n = 1-10(100)$) и более; $R_{\text{н}}$ — сопротивление $RC$-нагрузки; $i_{n\text{к}2}(t)$ — ток в выходном колебательном контуре, соответствующий $n$-у дискретному энергетическому уровню Ландау; $S_{\text{п}1}$ — крутизна преобразования энергии дискретного энергетического уровня Ландау в напряжение; $E_{L_n}$ — $n$-й дискретный энергетический уровень Ландау.

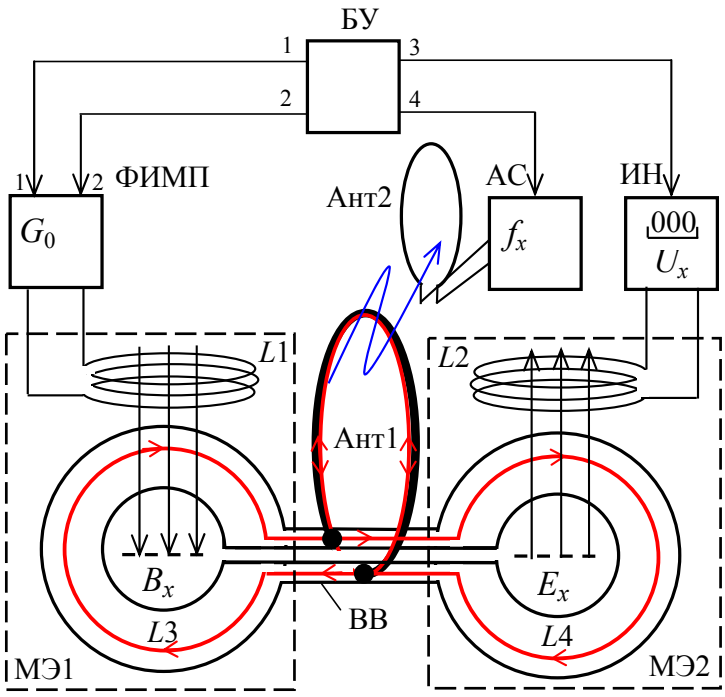



**Рис. 4. Упрощенная комбинированная схема магнитополевого преобразователя**

Каждому дискретному значению напряженности импульсного магнитного поля соответствует определенное значение напряжения (21).

В процессе измерений определяется, подсчитывается и запоминается общее количество дискретных энергетических уровней Ландау для всего диапазона дискретных значений напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты.

Процесс определения дискретных уровней Ландау и параметров радиоимпульсов повторяется до тех пор, пока уменьшение напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты не приводит к последнему скачкообразному переходу электронов на новый энергетический уровень Ландау (рис 5, а). По полученным данным строится, в виде огибающей, зависимость выходного сигнала измерителя напряжения ИН (вольтметра) от входного сигнала. Последний выражается в вольтах и обеспечивает дискретное (шаг за шагом) изменение тока, а, следовательно, и напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты (рис. 5, рис. 6 и рис. 7).

На рис. 5, рис. 6 и рис. 7 приведены графические построения, отражающие результаты экспериментальных исследований уровней Ландау для случаев выполнения волновода из металлов. Анализ полученных результатов показал, что: 1) для металлов уровни Ландау эквидистантны; 2) наблюдается 4-5 и даже 6 радиоимпульсов; 3) огибающая начальных точек уровней Ландау носит кубический или квадратичный характер; 4) огибающая является нисходящей функцией в заданной системе шкал.

Для плоского двухконтурного волновода замкнутого типа, выполненного из меди толщиной 2,5 мм и площадью поверхности равной 1875 мм$^2$, экспериментально было установлено шесть дискретных энергетических уровня Ландау (см. рис. 5, а). Результаты измерений приведены в виде совокупности горизонтально расположенных прямоугольников. Для волновода, выполненного из меди толщиной 0,5 мм, экспериментально было установлено пять дискретных энергетических уровня Ландау (рис. 6). Марка меди в обоих случаях не была известной.

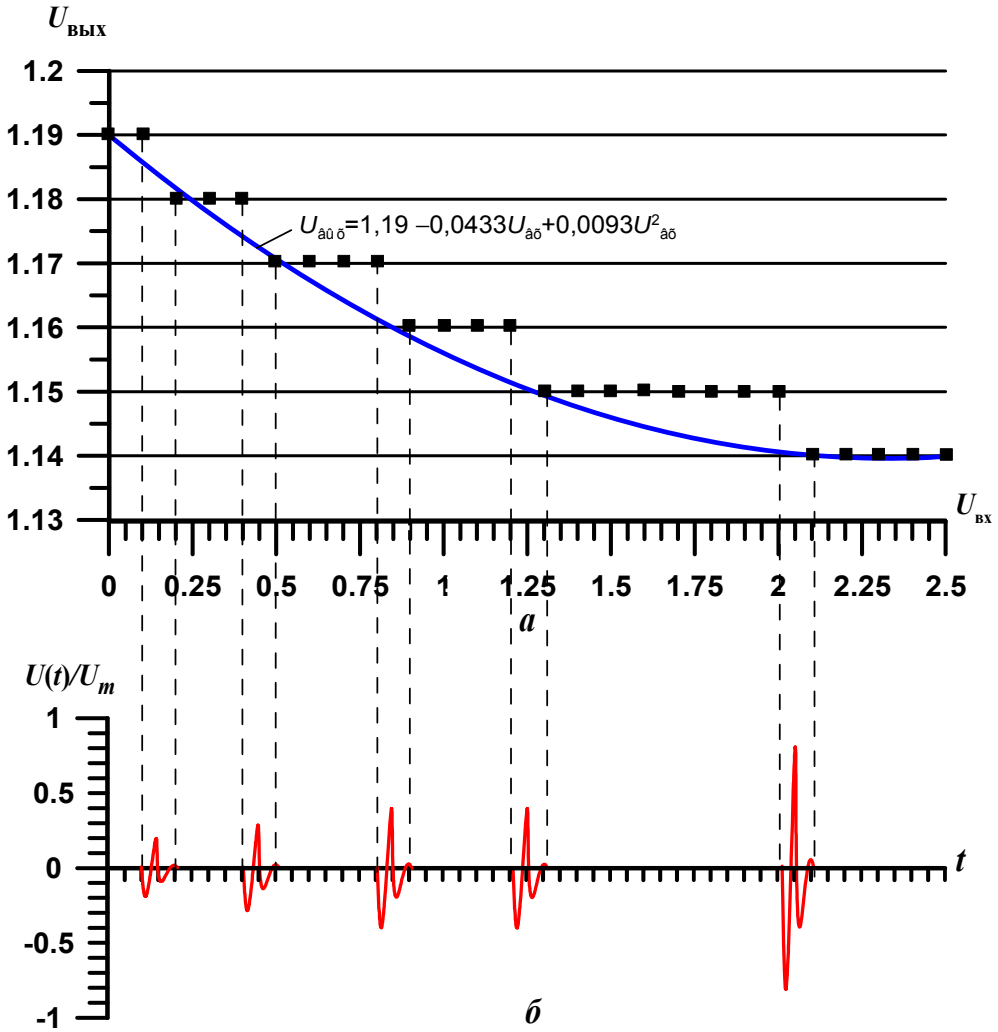



**Рис. 5. Графическое изображение процесса излучения радиоимпульсов при переходе электронов с одного энергетического уровня Ландау на другой (волновод выполнен из меди толщиной 2,5 мм)**

Огибающие энергетических уровней Ландау имеют линейную и квадратичную (рис. 5, а) линейную и кубическую (рис. 6, а) составляющие. Экспериментально полученные результаты подтвердили равноудаленность (эквидистантность) дискретных энергетических уровней Ландау.

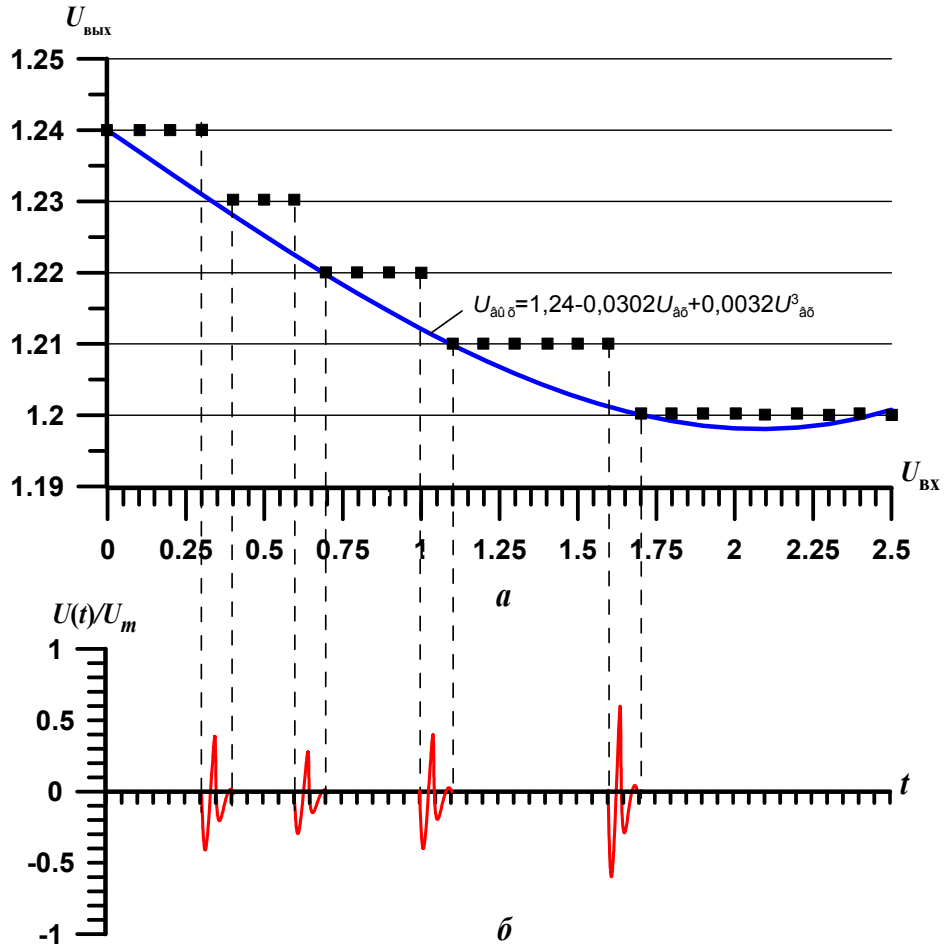



**Рис. 6. Графические изображения процесса излучения радиоимпульсов при переходе электронов из одного энергетического уровня Ландау на другой (волновод выполнен из меди толщиной 0,5 мм)**

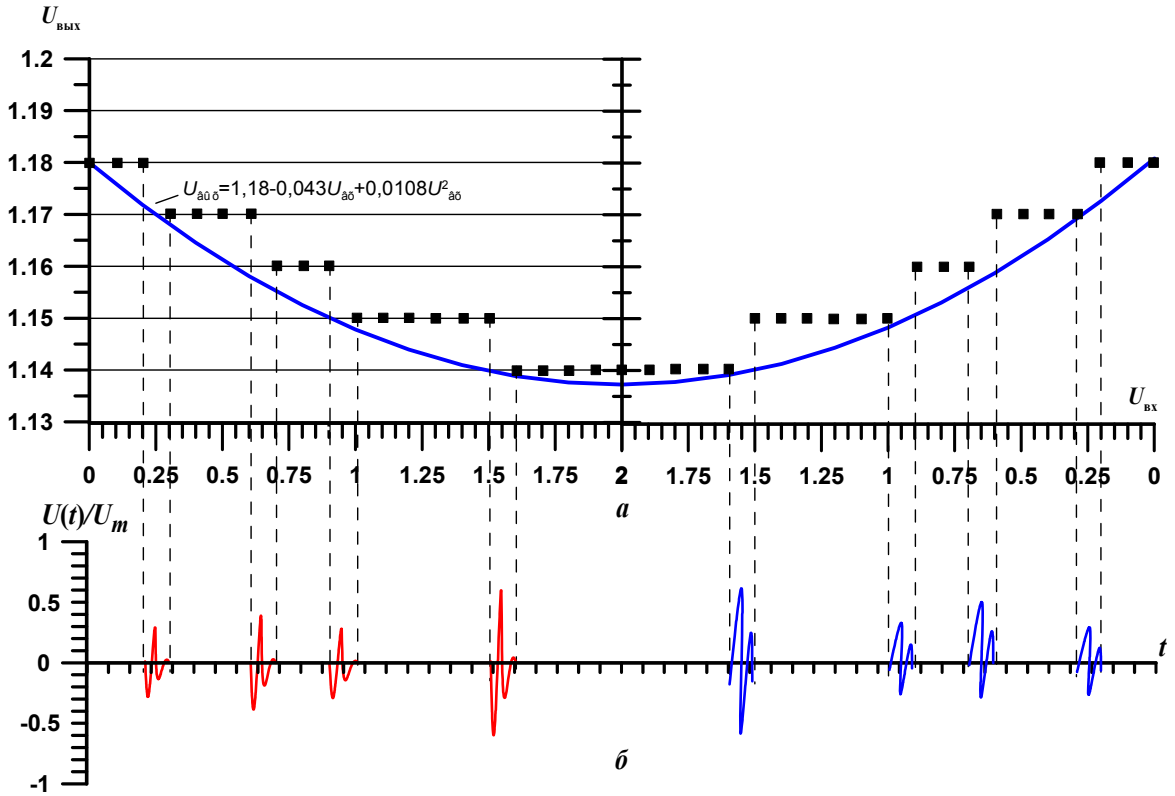



**Рис. 7. Графические изображения характера изменения дискретных энергетических уровней Ландау и процесса излучения радиоимпульсов во времени**

Дополнительно на рис. 7 графически показаны процессы излучения во времени радиоимпульсов

при переходе электронов с одного энергетического уровня Ландау на другой в режиме дискретного (шаг за шагом) уменьшение (левая часть графика) и увеличение (правая часть графику) уровня напряженности импульсного магнитного поля, действующего на волновод.

Следует отметить, что спектр радиоимпульса определяется основной высокой частотой импульсного магнитного поля и его гармониками, количество которых ограничивается полосой пропускания (прозрачности) антенны.

Описанный магнитополевой метод измерения уровней Ландау обеспечивает достаточно высокую точность определения напряжения и значений параметров радиоимпульса. Это достигается за счет:

создания технических, технологических и методических условий для осуществления управляемого движения отрицательно заряженных квазичастиц в магнитном поле, т.е. за счет использования волноводов замкнутого типа, выполненных из образцов исследуемых материалов с одинаковой формой и параметрами, а также за счет использования априори определенной совокупности методов и средств преобразования физических величин;

экранирования контуров волновода и катушек индуктивности от действия внешних магнитных полей;

формирования импульсного магнитного поля заданной формы и частоты и, как следствие, — одновременном формировании стоячей и бегущей волн в волноводе;

определения и установления условий управляемого взаимодействия отрицательно заряженных квазичастиц материала с импульсным магнитным полем;

использования передающей антенны с параметрами, идентичными параметрам одновитковых колебательных контуров волновода, которая не экранирована от воздействия внешних магнитных полей и служит для передачи (высвобождения) энергии в окружающее пространство;

формирования сигналов с использованием энергии отрицательно заряженных квазичастиц материала, то есть сигналов электрической природы, параметры которых могут быть измерены обычными приборами;

простой реализации метода измерения энергии дискретных энергетических уровней Ландау и получения достоверных результатов при нормальных температурных условиях проведения измерений.

**3. Схемотехнические решения магнитополевых измерителей дискретных энергетических уровней Ландау**

Экспериментально установлено, что, при измерениях уровней Ландау в материалах макромира, эффективное проявление физического явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество имеет место при выполнении следующих условий:

1) в макромире из исследуемого материала, являющимся источником конечного множества электронов и других отрицательно заряженных квазичастиц в единице объема, изготавливается функциональный элемент измерительной системы, прибора или измерительного преобразователя — волновод или резонатор ;

2) из образцов исследуемого материала изготавливаются стандартные образцы волноводов одного или нескольких типоразмеров (разных площадей, толщин, классов точности обработки поверхности и т.п.);

3) конструктивно каждый волновод должен быть выполненным в виде физической системы замкнутого типа;

4) функциональный элемент должен представлять собой плоский двухконтурный волновод с одним или конечным числом n витков в каждом контуре; предпочтительно их одинаковое количество и исполнение, —диаметр контуров волновода должен превышать его толщину;

5) параметры плоских одновитковых волноводов должны быть нормированными как по значениям площади по-верхности, объема и класса точности обработки поверхности, так и по значениям индуктивности и собственной емкости контуров;

6) в волноводах должны быть предусмотрены элементы соединения их с передающей антенной;

7) типоразмеры волноводов должны выбираться с учетом типоразмеров ферритовых броневых сердечников или иных стандартных магнитных экранов;

8) промышленное изготовление волноводов должно осуществляется по априори разработанным технически условиям на волноводы и на соответствующие им магнитные экраны, т.е. как на конструктивно законченный электромеханический узел;

9) работа магнитополевых измерительных преобразователей при низких температурах не требует изменений в конструкции волновода при условии, что исследуемый материал не меняет свои электромеханические параметры и характеристики или они изменяются в допустимых пределах.

Описанный выше метод измерений дискретных энергетических уровней Ландау был проиллюстрирован на упрощенном варианте комбинированной схемы магнитополевого измерителя.

Ниже рассматриваются новые варианты реализации магнитополевого метода измерения дискретных уровней Ландау на базе схемотехнического решения магнитополевого измерительного преобразователя физических величин, описанного в работе [11]. Особенностью указанного преобразователя является полная симметрия схемотехнического решения.

1-й вариант. На рис. 8 приведена комбинированная схема не сложного в исполнении магнитополевого измерителя дискретных уровней Ландау без использования микроконвертора или

микропроцессора.

В приведенном на рис. 8 схемотехническом решении магнитополевой измерительный преобразователь дополнен передающей и приемной антеннами Ант1 и Ант2. Передающая антенна Ант1 подключена к волноводу в его геометрическом центре, а приемная антенна Ант2 — ко входу антенного усилителя Ус. В схеме предусмотрена возможность подключения внешнего анализатора спектра или высокочастотного осциллографа.

Источник питания ИП формирует: микроток, подаваемый на вход «1» высокочастотного колебательного контура $L1$ для обеспечения отрицательной обратной связи по магнитному потоку; напряжение питания транзисторного ключа $VT1$; напряжение питания антенного усилителя Ус, цифрового вольтметра ЦВ и генератора частоты коммутации ГЧК.

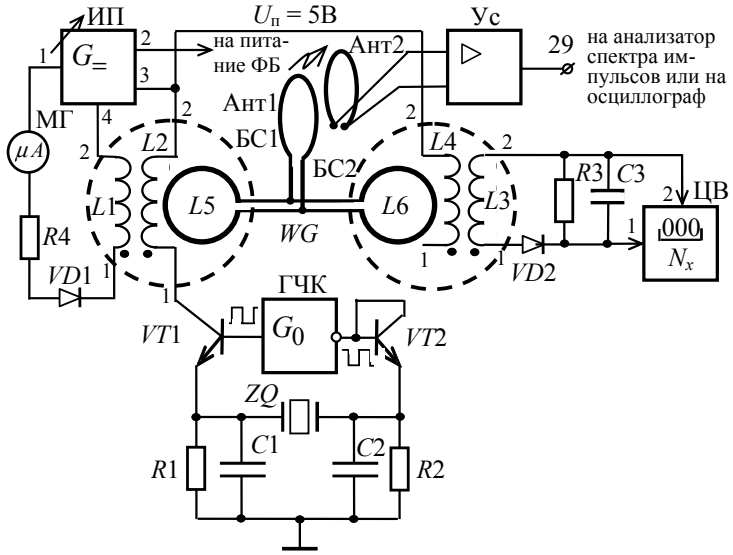



**Рис. 8. Функциональная схема магнитополевого измерителя уровней Ландау (не сложный в реализации вариант)**

После включения источника питания ИП, на парафазных выходах кварцованного генератора ГЧК низкой частоты коммутации появится сигнал типа меандр, который подается на базы транзисторных ключей $VT1$ и $VT2$ и поочередно включает их. При прохождении тока через резисторы $R1$ и $R2$ возникает падение напряжений на них. Разница этих напряжений возбуждает высокочастотный кварцевый резонатор ZQ, который, благодаря наличию конденсаторов $C1$ и $C2$, начинает генерировать высокочастотные колебания (рис. 8). В результате на выходе коллектора транзисторного ключа $VT1$ формируются пачки импульсов высокочастотного сигнала типа меандр.

Под действие этого сигнала в катушке индуктивности $L2$ первой пары высокочастотных колебательных контуров возникает соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты, Значение напряженности этого поля зависит от значений двух токов: 1) тока, обусловленного напряжением на виходе «3» ИП; 2) тока от наведенной электродвижущей силы в катушке индуктивности $L1$. Необходимо отметить, что электродвижущая сила наводится за счет взаимоиндукции между катушками индуктивности $L1$ и $L2$. При одинаковом числе витков, т.е. при коэффициенте трансформации $k_{тр} = 1$, в катушке индуктивности $L1$ будет наводится электродвижущая сила того же значения, что и высокочастотный сигнал на катушке индуктивности $L2$. Причем направления первого и второго (наведеного) токов устанавливаются противоположными, (токи текут в разные стороны). Первый ток, выпрямленный диодом $VD1$ и ограниченный резистором $R4$, противодействует другому току, который течет в катушке индуктивности $L2$.

С помощью катушки индуктивности $L2$ формируется соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты и практически прямоугольной формы. Линии напряженности этого поля направлены перпендикулярно плоскости поверхности первого плоского одновиткового контура $L5$ монолитного волновода $WG$ (рис. 8). В результате дискретного изменения напряженности магнитного поля, его силовое действие на электроны исследуемого материала уменьшается или увеличивается, обеспечивая, при определенных значениях напряженности, формирование дискретных энергетических уровней Ландау сложной трехмерной формы. Практически это достигается путем подачи на катушку индуктивности $L1$ дискретно возрастающего напряжения с шагом, например, 0,1 В (рис. 6, в), которое устанавливается на выходе «1» ИП, подключенного к выводу «1» катушки индуктивности $L1$,

На рис. 6, а приведены графические изображения процессов формирования дискретных энергетических уровней Ландау, а на рис. 6, б — моменты времени излучения радиоимпульсов при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой.

Приведенные на рис. 9, в дискретные значения входных ($U_{вх} = U_1$) и выходных ($U_{вых}$) напряжений (0,4 В, 0,7 В, 0.11 В, 0,17 В и 1,24 В, 1,23 В, 1,22 В, 1,21 В) получены экспериментально при использовании

монолитного волновода WQ (рис. 3), выполненного из образца листовой меди толщиной 0,5 мм.

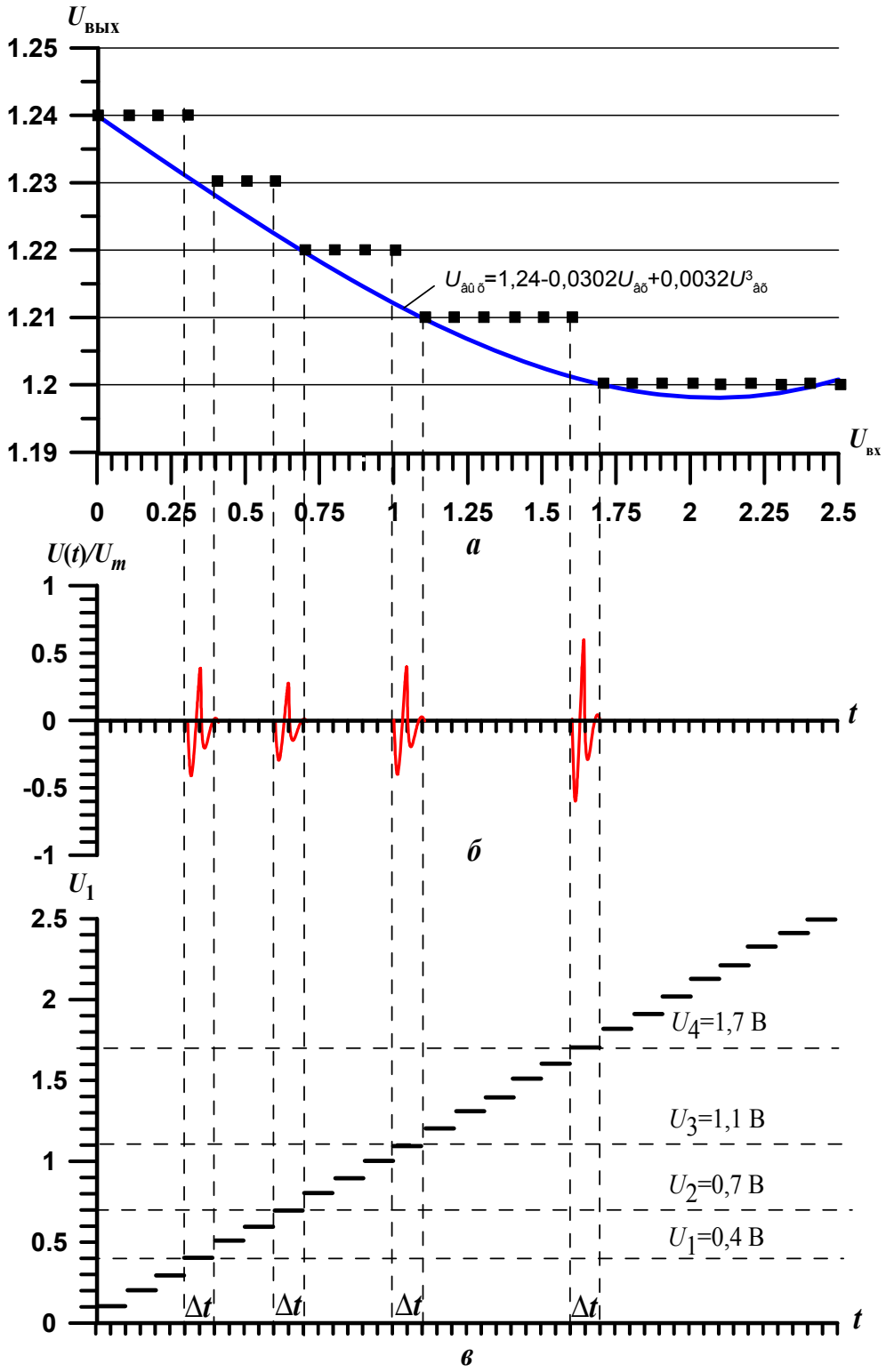



**Рис. 9. Графические изображения процесса формирования дискретных энергетических уровней Ландау и радиоимпульсов**

Благодаря воздействию на материал волновода пачек импульсов магнитного поля с низкой частотой следования, в нем формируется, на наш взгляд, объемная стоячая электромагнитная волна, максимум и минимум которой совпадает с геометрическими центрами катушек индуктивности $L1$, $L2$ и $L3$, $L4$. Максимумы и минимумы (энергии) стоячей волны колеблются поперек плоскости волновода $WG$ и обладают свойством сохранения накопленной энергии. Поочередное изменение максимума на минимум, а минимума на максимум (энергии) стоячей волны напоминает работу двухпоршневого насоса. Это обусловило введение и использование в технической литературе термина «энергетический насос», который характеризует процесс изменения энергии в заданном объеме материала (или вещества) под периодическом

воздействием импульсного магнитного поля высокой частоты.

За счет воздействия импульсного магнитного поля высокой частоты в волноводе создается, «наложенная» на объемную стоячую волну, объемная бегущая (продольная) электромагнитная волна, обусловленная сложным колебательно-вращательно-поступательным движением электронов соответствующего энергетического уровня

Ландау. Ее движение осуществляется непрерывно по замкнутому контуру волновода.

Благодаря периодическому действию силовых линий напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты обеспечивается периодическая передача (перекачка) энергии электромагнитного поля первого одновиткового контура ( $L5$ ) во второй ( $L6$ ), т.е. с левой части материала волновода в правую с одновременным наведением электродвижущей силы в катушке индуктивности $L4$. Из катушки индуктивности $L4$ сигнал трансформируется в катушку индуктивности $L3$. С выхода колебательного контура $L3$ сигнал $u_{Li}(t)$ поступает на измеритель среднего значения напряжения ИП (рис. 8), где выпрямляется с помощью, например, однополупериодного выпрямителя, усредняется (фильтруется) на *RC*-нагрузке и измеряется. Математически процесс получения среднего значения напряжения описывается уравнением величин (6).

Действующее значение энергетического уровня Ландау, приведенное, согласно СИ, к единице пути (к 1 м) и к единице площади (к $1\ \text{м}^2$), определяется, при нормальных условиях выполнение измерений, согласно уравнению величин [11]

$$E_{LL} = s_{\text{пр}} \frac{S_{\text{о}}}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_{\text{н}}} \frac{l_0}{l_x}\ \text{эВ} = s_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{S_{\text{о}}}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_{\text{н}}}\ \text{эВ} = s'_{\text{пр}} \frac{U_x^2 t_x}{R_{\text{н}}}\ \text{эВ}, \quad (23)$$

где $E_{LL}$ — энергетический уровень Ландау; $s_{\text{пр}}$ — крутизна преобразования, эВ/Дж; $l_x$ — средняя длина замкнутого контура волновода по которому движутся электроны, м; $l_0$ — нормированная по значению длина контура волновода, равная 1 м; $S_0$ — нормированная по значению площадь поверхности материала волновода, на который действует магнитное поле, $1\ \text{м}^2$; $S_x$ — реальная площадь исследуемого материала волновода, $\text{м}^2$; $t_x = n\tau_0$ — время усреднения; $n = 1, 2, 3, \ldots$; $\tau_0$ — постоянная времени интегрирования ( $\tau_0 = 1\ \text{с}$ ); $U_x = U_{\text{хсв}}$; $R_{\text{н}}$ — сопротивление *RC*-нагрузки; $s'_{\text{пр}} = s_{\text{пр}} / l_x S_x$ эВ/Дж при $l_0 = 1\ \text{м}$, $S_0 = 1\ \text{м}^2$.

При измерениях определяется, подсчитывается и запоминается общее количество дискретных энергетических уровней Ландау для всего диапазона заданных дискретных значений напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты.

2-й вариант. На рис. 10 приведена комбинированная схема магнитополевого измерителя дискретных уровней Ландау с использованием микроконвертора. При прочих идентичных функциональных блоков схем измерителей, приведенных на рис. 8 и рис. 10, в последнюю из них введен микроконвертор МК с клавиатурой КЛ, оперативным запоминающим устройством ОЗУ и цифровым отсчетным устройством ЦОУ, анализатор спектра АС и усилитель мощности УМ, а также триггер, включенные, как показано на рис. 10.

Введение МК позволило: программным путем задавать и контролировать значение напряжения питания, подаваемого на коллектор первого транзисторного ключа *VT*1, задавать частоту коммутации и формировать соответствующий сигнал на выходе «д» порта *P*1 МК; измерять (преобразовывать в код числа) напряжение на выходе *RC*-нагрузки, которое через вход «в» коммутатора порта *P*0 подается на вход встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя; задавать на выходе «б» порта *DA*2 напряжение, подаваемое на колебательный контур *L*1 для формирования сигнала обратной связи по магнитному потоку; осуществлять запоминание всех результатов измерений в оперативном запоминающем устройстве ОЗУ; отображать полученные данные на цифровом отсчетном устройстве ЦОУ и, при необходимости, изменять входные данные и программу работы магнитополевого измерителя с помощью клавиатуры КЛ.

С целью расширения функциональных возможностей описанного магнитополевого измерителя в части измерения не только энергии дискретных энергетических уровней Ландау, но и энергии Ферми каждого уровня, а также других физических величин, было предложено ввести в измеритель автоматический переключатель АП и кодоуправляемый преобразователь «код-перемещение» ПКП. Последний используется для обеспечения автоматического подключения и отключения передающей антенны Ант1 от волновода *WQ*. При этом автоматический переключатель АП управляется по заданной программе сигналом с выхода «д» порта Р1 МК, а ПКП — цифровыми сигналами, поступающими через общую шину ОШ с выходов порта *P*3 МК.

3-й вариант. Для обеспечения возможности дискретного изменения частоты импульсного магнитного поля, видоизменена схема генератора пачек импульсов. Вместо симметричного двухтактного генератора в магнитополевом измерителе, схема которого приведена на рис. 5, используется обычная широкодиапазонная схема кварцованного генератора КГ.

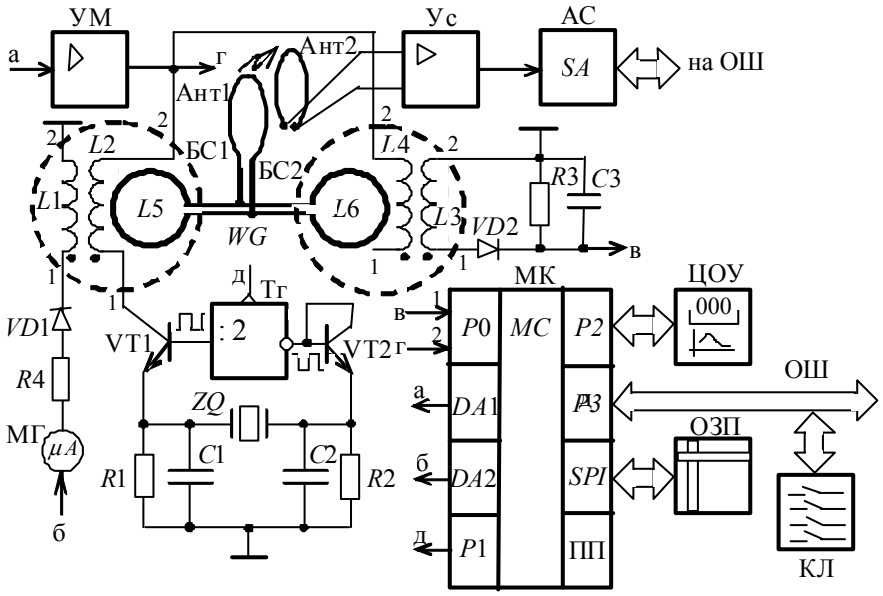



**Рис. 10. Комбинированная схема магнитополевого измерителя дискретных энергетически уровней Ландау с микроконвертором**

Замена одного кварцевого резонатора на другой и обеспечивает смену частоты импульсного магнитного поля на выходе катушки индуктивности *L*2. Подача сигнала высокой частоты с выхода КГ на базе транзисторных ключей *VT*1и *VT*2 осуществляется через логические элементы ЛЭ1 и ЛЭ2, которые управляются выходными сигналами триггера Тг. Для обеспечения симметрии сигнала, счетный вход триггера подключен к выходу порта *P*0 МК.

Магнитополевому измерителю, выполненному по схеме, приведенной на рис. 11, присущи три режима работы: 1) измерение дискретных энергетических уровней Ландау; 2) измерение энергии Ферми; 3) измерение физических величин разной природы.

Первый режим работы обеспечивается при функциональных блоках, соединенных как показано на рис. 11; второй — при отключенной передающей антенне Ант1 и положении АП, противоположном указанному на рис. 11. Третий режим работы осуществляется при отключенной передающей антенне Ант1 и при положении АП, указанному на рис. 11. При этом используются сенсоры с выходом по току или по напряжению, т.е. типа «физическая величина – ток (напряжение)».

Более подробно указанные измерители описаны в работе [12].

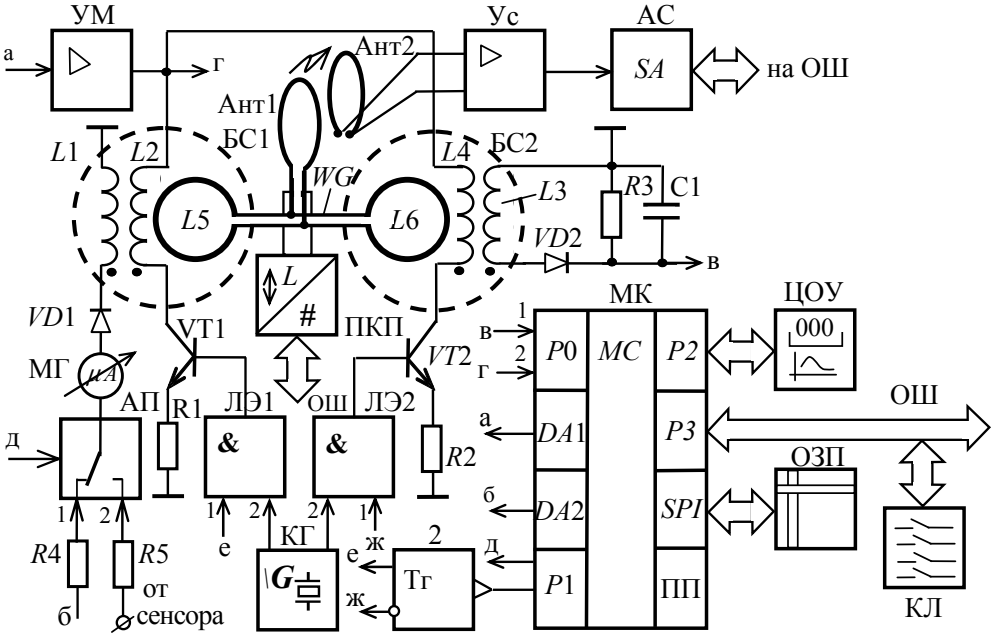



**Рис. 11. Функциональная схема магнитополевого измерителя дискретных энергетических уровней Ландау с расширенными функциональными возможностями**

В целом, магнитополевые измерения обогатились новыми техническими решениями измерителей физических величин энергетической, вещественной и информационной групп.

**Выводы.** Квантование Ландау характеризует колебания электронных свойств материалов в зависимости от значения индукции приложенного магнитного поля.

Орбитальные энергетические уровни или уровни Ландау впервые получены им в 1930 году как решение уравнения Шрёдингера. Количество электронов на уровне прямо пропорционально силе приложенного магнитного поля.

Нами экспериментально установлено, что дискретные энергетические уровни Ландау существуют не только в металлах, но и в диэлектриках. Это указывает на то, что в диэлектриках (в условно проводящих и в слабо проводящих материальных средах) может наблюдаться диамагнетизм электронов переноса.

Существование связи уровня Ландау с магнитной индукцией позволяет получить уравнение величин для энергии *n*-го уровня Ландау, удобное для анализа.

На сегодняшний день отсутствуют промышленные приборы для измерения дискретных энергетических уровней Ландау и энергий Ферми материалов.

Уравнение измерений напряженности магнитного поля соленоида выводят на основе закона Био – Савара – Лапласа с учетом принципа суперпозиции магнитных полей системы элементарных круговых токов.

Получены аналитические выражения для магнитного потока, напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты; получено уравнение измерений *n*-го энергетического уровня Ландау.

Разработан и описан метод измерения дискретных энергетических уровней Ландау любых материалов макромира при нормальных условиях проведения измерений, не требующих сверхнизких температур.

Экспериментально установлено, что для реализации метода априори должны быть созданы физические условия проведения измерений, при которых выполняются, прежде всего, законы сохранения механической и электромагнитной энергии в веществе, и закон электромагнитной индукции Фарадея. Это позволяет обеспечить фундаментальные взаимодействия соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты с электронами исследуемого материала. Для передачи энергии дискретного энергетического уровня Ландау в адекватную энергию радиоимпульса необходимо создать условия для высвобождения энергии электронов при скачкообразном переходе их с одного энергетического уровня на другой. Реализация указанных условий достигается путем изготовления из исследуемого материала монолитного плоского двухконтурного волновода замкнутого типа, передающей антенны, устанавливаемой между контурами волновода, и цилиндрических катушек индуктивностей, формирующих соленоидальное векторное поле.

Показана сущность и особенности методов и средств измерений дискретных энергетических уровней Ландау и их энергий.

Приведены графические построения, отражающие результаты экспериментальных исследований уровней Ландау для случаев выполнения волновода из металлов.

Экспериментально полученные результаты подтвердили равноудаленность (эквидистантность) дискретных энергетических уровней Ландау.

Практически наблюдается 4-5 и даже 6 выбросов радиоимпульсов.

Огибающие уровней Ландау носят кубический или квадратичный характер и являются нисходящими в заданной системе шкал. Получены соответствующие аналитические выражения для огибающих.

Перечислены условия практической реализации магнитополевого метода измерения дискретных энергетических уровней Ландау материалов макромира.

Описаны три варианта схемотехнических решений магнитополевых измерителей уровней Ландау: 1) упрощенный вариант; 2) с использованием микроконвертора; 3) с расширенными функциональными возможности по измерению физических величин. Показаны различия и преимущества этих решений:

Наибольший практический интерес представляют структуры магнитополевых измерителей уровня Ландау на микроконтроллерах. Микроконтроллеры обеспечивают высокую степень автоматизации процесса измерений и высокую точность измерений.

Полученные результаты расширяют наши представления о магнитополевых методах и средствах измерений уровня Ландау при нормальных условиях проведения этих измерений.

Дальнейшее развитие магнитополевых методов и средств измерений невозможно без проведения широкомасштабных экспериментальных исследований.

**Литература**

1. Дубровский И. М. Новая теория электронного газа в магнитном поле и задачи для теории и эксперимента [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ufm.imp.kiev.ua/article/v17/i01/Usp.Fiz.Met.17.053.pdf.

2. Левитационная плавка [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.youtube.com/watch?v =Dkp Ez7znpnc.

3. Квантование Ландау [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://en.m.wikipedia.org/wiki/Landau_ quantization.

4. Уровни Ландау [Электронный ресурс]. – Режим доступа :

http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/694/ index.html.

5. Уровни Ландау [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%BE%D0%B2% D0%BD%D0%B8_%D0%9B%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%83.

6. Напряженность магнитного поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://online.mephi.ru/courses/physics/electricity /data/course/7/7.2.html.

7. Ландау уровни [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://femto.com.ua/articles/part_1/1919.html.

8. Исследование магнитного поля соленоида [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://cito-web.yspu.org./link1/lab/lab _elect/lab_elekt12.pdf.

9. Магнитное поле соленоида [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%D1%8D%D0 %BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%BC/02-7.htm.

10. Определение индуктивности соленоида [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://tsput.ru/res/fizika /9/e/lr_e_10.pdf.

11. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: Магнитополевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 6. Измерение энергетического уровня Ферми и энергии Ферми при нормальных условиях проведения измерений / В.Т. Кондоаьлв // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 3. – С. 241–254.

12. Патент Україн на винахід № 119073. Магнітополевий вимірювальний перетворювач / Кондратов В.Т. Бюл. № 8, 25.04.2019.

13. Энергетический уровень [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https: // ru. Wikiped ia. Org / wiki /% D0% AD% D0% BD% D0% B5% D1% 80% D0% B3% D0% B5% D1% 82% D0% B8% D1% 87% D0% B5% D1% 81% D0% BA% D0% B8% D0% B9_% D1% 83% D1% 80% D0% BE% D0% B2% D0% B5% D0% BD% D1% 8C.

**References**

1. Dubrovskij I. M. Novaya teoriya elektronnogo gaza v magnitnom pole i zadachi dlya teorii i eksperimenta [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ufm.imp.kiev.ua/article/v17/i01/Usp.Fiz.Met.17.053.pdf.

2. Levitacionnaya plavka [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://www.youtube.com/watch?v =Dkp Ez7znpnc.

3. Kvantovanie Landau [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://en.m.wikipedia.org/wiki/Landau_ quantization.

4. Urovni Landau [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/694/ index.html.

5. Urovni Landau [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%BE%D0%B2% D0%BD%D0%B8_%D0%9B%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%83.

6. Napryazhennost magnitnogo polya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://online.mephi.ru/courses/physics/electricity /data/course/7/7.2.html.

7. Landau urovni [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://femto.com.ua/articles/part_1/1919.html.

8. Issledovanie magnitnogo polya solenoida [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://cito-web.yspu.org./link1/lab/lab _elect/lab_elekt12.pdf.

9. Magnitnoe pole solenoida [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%D1%8D%D0 %BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0% BC/02-7.htm.

10. Opredelenie induktivnosti solenoida [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://tsput.ru/res/fizika /9/e/lr_e_10.pdf.

11. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya: Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshestvo. Chast 6. Izmerenie energeticheskogo urovnya Fermi i energii Fermi pri normalnyh usloviyah provedeniya izmerenij / V.T. Kondoalv // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 3. – S. 241–254.

12. Patent Ukrayin na vinahid № 119073. Magnitopolevij vimiryuvalnij peretvoryuvach / Kondratov V.T. Byul. № 8, 25.04.2019.

13. Energeticheskij uroven [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https: // ru. Wikiped ia. Org / wiki /% D0% AD% D0% BD% D0% B5% D1% 80% D0% B3% D0% B5% D1% 82% D0% B8% D1% 87% D0% B5% D1% 81% D0% BA% D0% B8% D0% B9_% D1% 83% D1% 80% D0% BE% D0% B2% D0% B5% D0% BD% D1% 8C.

Рецензія/Peer review : 7.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-192-194
УДК 621.311.001.57

Д.Ю. ЗУБЕНКО, О.М. ПЕТРЕНКО
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени О.Н. Бекетова

# ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВИЗОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Электрические двигатели применяются на самом экологически чистом наземном транспорте – электротранспорте. Однако, используемые электродвигатели выделяют значительное количество тепла из-за больших мощностей, что в свою очередь влияет как на работу самих двигателей, так и отрицательно влияет на окружающую среду путем повышения температуры. В данной статье рассматриваются вопросы диагностики асинхронных электродвигателей с помощью тепловизора и анализа полученной картинки при помощи нейронных сетей. Данная методика позволяет следить за предельно-допустимым излучением тепловой энергии в атмосферу, а также увеличить надежность работы электромеханической системы.*

***Ключевые слова**: тепловой контроль, электродвигатель, тепловизор, диагностика, бесконтактные методы, нечеткая логика, безотказная работа, нейронная сеть.*

D. ZUBENKO, O. PETRENKO
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

**DIAGNOSTICS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR THERMAL INSULATOR USING NEURAL NETWORKS**

*Electric engines are used on the most environmentally friendly land transport - electric transport. However, the used electric motors emit a significant amount of heat due to high power, which in turn affects both the operation of the engines themselves and negatively affects the environment, by increasing the temperature. This article addresses the issues of diagnosing asynchronous electric motors using a thermal imager and analysing the resulting image using neural networks. This method allows you to monitor the maximum permissible radiation of thermal energy into the atmosphere, as well as to increase the reliability of the electromechanical system. Electric transport is one of the environmentally friendly technical means for the transport of passengers. However, the operation of its main electrical components contributes to the release of significant amounts of heat into the atmosphere, which adversely affects the environment and leads to environmental changes on the planet. Failures of electric rotating motors also lead to operation failures and can be listed as: stator faults, rotor electrical faults, mechanical rotor faults. However, the methods for the faults mentioned become complex and specific. In the literature, methods for diagnosing faults have been developed by scientists. Analyses of electrical signals, acoustic signals, vibrations, thermal imaging of electric motors have been very popular in recent literature. Methods for diagnosing electrical faults in electric motors have been developed in the literature. MCSA (Motor Current Signature Analysis) is a fault diagnosis technology. In the literature, MCSA was used to detect specific malfunctions of electrical and mechanical asynchronous motors. MCSA has many advantages, because it is not expensive. Infrared physics and technologies of stator winding diagnostics, not subject to stress or asymmetry. As well as the ease of installation of current sensors. However, this has drawbacks, such as stator current data must be selected after the engine speed reaches a steady state. Vibration alarms were also very popular for troubleshooting. Methods based on vibration analysis have an advantage and are more sensitive than MCSA to certain malfunctions.*

***Keywords**: thermal control, electric motor, thermal imager, diagnostics, contactless methods, fuzzy logic, trouble-free operation, neural network.*

## Вступление

Электрический транспорт является одним из экологически чистых технических средств для перевозки пассажиров. Однако работа его основных элетромеханических узлов способствует выделению значительных объемов тепла в атмосферу, что неблагоприятно влияет на окружающую среду и приводит к экологическим изменениям на планете. Также неисправности электрических вращающихся двигателей приводят к отказам работы и могут быть перечислены как: неисправности статора, электрические неисправности ротора, механические неисправности ротора [1]. Однако методы упомянутых неисправностей становятся сложными и специфичными [2]. В литературе методы диагностики неисправностей были разработаны учеными [1–7]. Анализы электрических сигналов, акустических сигналов, вибрации, тепловидение электродвигателей были очень популярны в недавней литературе. Методы диагностики неисправностей электрических токов электродвигателей были разработаны в литературе [3–6]. MCSA (анализ сигнатуры тока двигателя) является технологией диагностики неисправностей. В литературе MCSA использовался для обнаружения специфические неисправности электрических и механических асинхронных двигателей [2,3,7]. MCSA имеет много преимуществ, потому что он не дорогой. Инфракрасная физика и технологии диагностики обмотки статора, не подверженная нагрузке или асимметрии. А также простота установки датчиков тока. Однако это имеет недостатки, такие как данные тока статора должны быть отобраны после того, как скорость двигателя достигнет установившегося состояния [3]. Вибрационные сигналы также были очень популярны для диагностики неисправностей [8–11]. Методы, основанные на анализе вибрации, имеют преимущество и более чувствительнее, чем метод MCSA к определенным неисправностям [2]. Эти методы были использованы для обнаружения конкретных неисправностей в двигателях, например, диагностика подшипников [9] или систем зубчатой передачи [10]. Методы, основанные на вибрационных сигналах, дают диагностику неисправности и сосредоточены на расположении спектральных компонентов, связанных с неисправности [8]. В статье представлено сравнительное исследование разных методологий частотного анализа, которые могут быть

использованы для обнаружения неисправности асинхронных двигателей, анализирующих сигналы вибрации во время запуск переходный процесс. Анализируемые сигналы вибрации были со сломанными стержнями ротора, два сломанных стержня, дисбаланс и дефекты подшипников.

Методология, предложенная в статье, применима, когда она не имеет токовых сигналов и имеет только вибрационные сигналы [8]. Методология, основанная на анализе вибрации для диагностики различных уровней равномерного износа в коробке передач и обнаружения несущий дефект, связанный с одной и той же кинематической цепью, был представлен [9]. Результаты анализа вибрации показали, что увеличение амплитуды в частотной составляющей сетки и ее соответствующие гармоники были связаны с наличием износа в коробка передач. Обзор последних достижений в диагностике гибридных отказов в системах зубчатых передач с использованием сигнала датчика вибрации был представлен [10, 11].

Исследователи использовали также акустические сигналы для диагностики неисправностей машины [12–15]. Методы, основанные на анализе акустического сигнала имеет преимущество в том, что дешевле, чем другие методы.

Предлагаемая методология может быть использована для выявления других типов неисправностей в асинхронные двигатели и в любом оборудовании, в котором звук и вибрации были опознаны как однозначное следствие неисправности. Однако предложенная методология имела некоторые ограничения.

В последнее время методы диагностики неисправностей, основанные на тепловидении получили заметное внимание [11–13]. Тепловидение рассматривается для улучшения контроля асинхронных двигателей с преимуществом неинвазивного метода [7]. Это можно заметить при анализе тепловых изображений связанных с неисправностями, анализ был представлен [20]. В предлагаемом способе использован переходный процесс и тепловой контроль при запуске двигателя. Далее это применимо при технике псевдоокраски на инфракрасном изображении двигателя, после оно достигло термического устойчивого состояния. Система контроля была реализована на асинхронном двигателе с использованием тепловизора [14]. Метод цветовой сегментации использовался для выявления аномальных горячих областей на тепловом изображении. Для распознавания горячих точек был реализован метод изменения интенсивности красного цвета.

Поэтому актуальная задача диагностики асинхронного электродвигателя тепловизором для уменьшения выделения тепла в окружающую среду и повышение надежности работы электротраспорта.

**Експериментальная часть**

Предлагаемые методы диагностики неисправностей имеют следующие этапы: получение теплового изображения, предварительная обработка, выделение признаков и классификация. В начале процесса распознавания тепловых изображений взяты с применением тепловизионной камеры FLIR E4 (диапазон температур: от 20 до 250 С, частота кадров: 9 Гц, детектор: (неохлаждаемый микроболометр) и программное обеспечение для ПК FLIR IR Camera Player.

На рынке есть много доступных тепловизионных камер с аналогичными или лучшими параметрами. Эти камеры также могут быть использованы для анализа.

Упомянутая тепловизионная камера находится на расстоянии 0,25 м от анализируемого мотора. Фильмы и тепловизионные изображения получены с использованием ПК программного обеспечения и тепловизионной камеры. Тепловые изображения имеют разрешение 320 х 240 пикселей. Следующее изображение пурпурного цвета рассчитывается. После этого функция извлечения выполняется с применение MoASoID и гистограммы изображения. Следующая классификация полученных векторов и признаков осуществляется с помощью NN (Классификатор ближайшего распознавания), K-means, BNN (нейронная сеть обратного распространения).

В тепловых изображениях извлечение цвета является важной задачей, потому что некоторые цвета преимущественнее других. Самые важные цвета были белый, пурпурный и красный для анализируемых изображений.

Самые высокие температуры имели белый цвет. Авторы решили анализировать пурпурный и белый. Пурпурный и белый цвета термальных

изображения трехфазного асинхронного двигателя получены с использованием Matlab.

Метод выбора областей определения изображений при помощи программы MoASoID разработан для множества тренировочных наборов и тепловых изображений электродвигателей.

Определение состояния электродвигателя описан во многих научных статьях [2–15]. Он назначает неклассифицированную векторную характеристику на множестве ранее классифицированных обучающих векторов признаков. Этот классификатор достигает высокой эффективности распознавания, без априорных предположений о распределении обучающих данных. Это одна из причин использовать его для диагностики неисправностей трехфазного асинхронного электродвигателя. Эта функция определяется как:

$$d(a,b) = \sum_{i=1}^{n} \left| a_i - b_i \right|, \quad (1)$$

где векторами признаков являются $a = [a_1, a_2, ..., a_n]$ и $b = [b_1, b_2, ..., b_n]$, $n = 1$ для MoASoID, $n = 256$ для гистограммы изображения.

**Выводы**

В этой статье авторы разрабатывают методы диагностики несправностей асинхронных

электродвигателей. Описанные методики на основе анализа тепловых изображений, полученных при снятии изображения с тепловизора на работающем электродвигателе. Авторы анализируют полученные тепловые изображения электродвигателя.

В статье авторы предлагают использовать нейронные сети для обработки изображения и ее распознавания.

Описанные методы диагностики неисправностей необходимы для защиты асинхронного электродвигателя и других типов вращающихся электродвигателей, такие как: двигатели постоянного тока, генераторы, синхронные двигатели.

Данные методы диагностики и анализа позволяют контролировать предельные значения выделения тепла в атмосферу и обезопасить работающую технику от отказов.

**References**

1. H. Henao, G.A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pusca, J. Estima, M. Riera-Guasp, S. Hedayati-Kia, Trends in fault diagnosis for electrical machines a review of diagnostic techniques, IEEE Ind. Electron. Mag. 8 (2) (2014) 31–42.

2. A.G. Garcia-Ramirez, L.A. Morales-Hernandez, R.A. Osornio-Rios, J.P. BenitezRangel, A. Garcia-Perez, R.D. Romero-Troncoso, Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis, Electr. Power Syst. Res. 114 (2014) 1–9, http://dx.doi.org/10.1016/j. epsr.2014.03.031.

3. Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping, Mustafa Khalid, Atheer Lauy Salih, Fault diagnosis of induction motor using MCSA and FFT, Electr. Electron. Eng. 1 (2) (2011) 85–92, http://dx.doi.org/10.5923/j.eee.20110102.14.

4. T. Ciszewski, L. Gelman, L. Swedrowski, Current-based higher-order spectral covariance as a bearing diagnostic feature for induction motors, Insight 58 (8) (2016) 431–434, http://dx.doi.org/10.1784/insi.2016.58.8.431.

5. M. Sulowicz, K. Weinreb, R. Mielnik, T. Zywczak, M. Jaraczewski, The method of current measurement in the rotor cage bars of prototype induction motor with the use of Rogowski coils, in: International Conference on Information and Digital Technologies (IDT), 2015, pp. 357–365.

6. M. Michalak, B. Sikora, J. Sobczyk, Diagnostic model for longwall conveyor engines, in: Man-Machine Interactions 4, ICMMI 2015, Book Series: Advances in Intelligent Systems and Computing, 391, 2016, pp. 437–448, http://dx.doi. org/10.1007/978-3-319-23437-3_37.

7. A.G. Garcia-Ramirez, L.A. Morales-Hernandez, R.A. Osornio-Rios, A. GarciaPerez, R.J. Romero-Troncoso, Thermographic technique as a complement for MCSA in induction motor fault detection, in: 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014, pp. 1940–1945.

8. P.A. Delgado-Arredondo, A. Garcia-Perez, D. Morinigo-Sotelo, R.A. OsornioRios, J.G. Avina-Cervantes, H. Rostro-Gonzalez, R.D. Romero-Troncoso, Comparative study of time-frequency decomposition techniques for fault detection in induction motors using vibration analysis during startup transient, Shock Vib. (2015), http://dx.doi.org/10.1155/2015/708034 Article Number: 708034.

9. J.J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, J.A. Ortega-Redondo, R.A. OsornioRios, R.D. Romero-Troncoso, Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain, Shock Vib. (2016), http://dx.doi.org/ 10.1155/2016/5467643 Article Number: 5467643.

10. Z.X. Li, Y. Jiang, C. Hu, Z. Peng, Recent progress on decoupling diagnosis of hybrid failures in gear transmission systems using vibration sensor signal: a review, Measurement 90 (2016) 4–19, http://dx.doi.org/10.1016/j. measurement.2016.04.036.

11. Z.X. Li, X.P. Yan, X.P. Wang, Z.X. Peng, Detection of gear cracks in a complex gearbox of wind turbines using supervised bounded component analysis of vibration signals collected from multi-channel sensors, J. Sound Vib. 371 (2016) 406–433, http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.021.

12. A. Glowacz, Z. Glowacz, Diagnosis of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals, Appl. Acoust. 117 (Part A) (2017) 20–27, http:// dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.10.012.

13. A. Glowacz, Fault diagnostics of acoustic signals of loaded synchronous motor using SMOFS-25-EXPANDED and selected classifiers, Tehnicki Vjesnik – Tech. Gaz. 23 (5) (2016) 1365–1372.

14. A. Deptula, P. Osinski, U. Radziwanowska, Decision support system for identifying technical condition of combustion engine, Arch. Acoust. 41 (3) (2016) 449–460.

15. A. Deptula, D. Kunderman, P. Osinski, U. Radziwanowska, R. Wlostowski, Acoustic diagnostics applications in the study of technical condition of combustion engine, Arch. Acoust. 41 (2) (2016) 345–350, http://dx.doi.org/ 10.1515/aoa-2016-0036.

Рецензія/Peer review : 4.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Ф. Смирний

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-195-198
УДК 004.891

О.В. ОГНЄВИЙ, О.І. АКАТОВ, В.П. НЕЗДОРОВІН
Хмельницький національний університет

# МЕТОД КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ КОНФІДЕНЦІЙНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ ХЕШУВАННЯ

*Відмови апаратного і програмного забезпечення, несанкціонований доступ, хакерські атаки – це ті загрози, для захисту від яких прикладаються великі зусилля. Для виключення можливості безслідної зміни заднім числом або видалення зареєстрованої інформації, в роботі запропоновано і досліджено метод для контролю цілісності зареєстрованої інформації. Під контролем цілісності інформації розуміється контроль тотожності символьного рядка перевірочної інформації відповідному рядку зареєстрованої раніше інформації. Мета полягає в розвитку алгоритмів, що забезпечують простий, загальнодоступний і надійний контроль цілісності конфіденційної інформації. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання: розвиток методу об'єктивного контролю цілісності інформації, заснованого на формуванні структури об'єднаних хешів, і розробка алгоритмів контролю і відновлення цієї структури з використанням розподіленого зберігання; розробка та дослідження алгоритмів хешування для оптимізації контролю цілісності інформації при зберіганні і передачі. Суть методу полягає в забезпеченні простоти, доступності, надійності та прозорості контролю цілісності даних в організаціях безпаперового документообігу, в забезпеченні авторських та інших прав, для програмного забезпечення нових видів банківського обслуговування, а також для вирішення інших завдань.*

*Ключові слова: інформаційні технології, захист інформації, конфіденційність інформації, контроль цілісності даних.*

O.V. OHNIEVYI, O.I. AKATOV, V.P. NEZDOROVIN
Khmelnytskyi National University

**METHOD FOR CONTROL INTEGRITY OF CONFIDENTIAL DATA BASED ON HASH FUNCTIONS**

*Failure of hardware and software, unauthorized access, hacker attacks are threats for the defence of which put great effort. In order to exclude the possibility of a consequent change or the delete of the registered information, in this work is proposed and investigated a method to control the integrity of the registered information. Control of the integrity of information is the control of the identity of the character string of the checking information to the corresponding line of previously registered information. The purpose is to develop algorithms that provide a simple, public and reliable control of the integrity of confidential information. To achieve this goal the following tasks are set: development of the method of objective control of the integrity of information based on the formation of the structure of mixed hashes, and the development of algorithms for control and restoration of this structure using distributed storage; development and research of hashing algorithms for optimization of information integrity control during storage and transmission. The essence of the method is to ensure the simplicity, accessibility, reliability and transparency of controlling the integrity of the data in the organizations of paperless circulation of documents, in providing copyright and other rights, software for new types of banking services, as well as for other tasks.*

*Key words: information of technologies, security information, confidentiality of information, data integrity control.*

## Вступ

В умовах глибокого проникнення інформаційних технологій в усі сфери життєдіяльності людини надійність ідентифікації інформації та контроль її цілісності стають важливою проблемою, причому як науково-технічною, так і соціальною. Науково-технічна проблема включає в себе створення математичних підходів, алгоритмів, програмного та апаратного забезпечення для вирішення цієї проблеми. Соціальний аспект проблеми пов'язаний з необхідністю створення загальнодоступної, зручної і захищеної системи надійної ідентифікації даних, адекватного ступеня розвитку інформаційних технологій.

Надійність ідентифікації інформації визначає в значній мірі і захищеність інформації, яка є «першорядним фактором, що впливає на політичну і економічну складові національної безпеки».

За існуючими оцінками більше 90% компаній стикалися з внутрішніми вторгненнями, більше половини стикаються з ними постійно, а втрати компаній тільки в США приблизно до 1 трлн дол. США. Велика частина втрат пов'язана з діями співробітників самих цих компаній, так як існуючі методи контролю цілісності даних контролюються самими власниками БД. Причинами свідомого корпоративного або особистого порушення цілісності інформації – видалення, спотворення, підміни – можуть бути помста, користь, страх, примус, вандалізм, цікавість, марнославство, самоствердження, кар'єрні ідеї, конкуренція, диверсія, саботаж та інші. Про частини порушень цілісності даних власник не повідомляє, приховуючи їх з різних причин: через відповідальність юридичну і комерційну, турботу про репутацію, вигоду від зробленого порушення, безвідповідальність, низьку кваліфікацію і т.п. Про приховування власниками БД відомих їм інсайдерських порушень цілісності даних повідомляє 78% респондентів цільового опитування і близько 90% відсотків опитаних при цьому вважають, що такий стан пов'язаний з нестачею ресурсів для управління. З останнього випливає висновок, що використання існуючих систем контролю цілісності даних вимагає занадто великих зусиль для забезпечення цього контролю і допускає приховування порушень цілісності даних.

Частину порушень цілісності інформації не знає найчастіше і сам власник БД. У деяких випадках власник БД не може виявити порушень цілісності інформації, що зберігається в БД інформації і при бажанні, особливо у випадках, наприклад, цілеспрямованого спотворення, введеного особами, які мають

санкціонований доступ до БД.

**Постановка задачі**

Метод контролю цілісності інформації заснований на використанні інформації, що міститься в контрольному ядрі. При цьому завдання забезпечення збереження цієї інформації вирішується, зокрема, широким поширенням реплікації контрольного ядра і описаними в роботі можливостями для перевірки його цілісності.

Усі існуючі методи, які призначені для контролю цілісності інформації, неефективні при цілеспрямованих інформаційних атаках, в тому числі за участю самих власників баз даних.

Для виключення можливості знищення контрольного ядра або спотворення його змісту будь-якими особами метод об'єднаних хешів передбачає поширення контрольного ядра в інформаційній мережі і пропонує алгоритми експлуатації таких розподілених відомостей про контрольне ядро, засновані на доведених властивостях контрольних ядер і їх фрагментів.

**Основна частина**

Від властивостей хеш-функцій залежать надійність даного методу, швидкість обчислень і ефективність використання обчислювальних ресурсів.

Особливості застосування хеш-функцій для цілей формування контрольних ядер об'єднані з необхідністю хешування конкатенації рядків; з необхідністю хешування відкритих рядків, тобто рядків з можливим продовженням; з властивостями хеш-функцій.

Нижче показаний загальний принцип хешування інформації за алгоритмом послідовного хешування.

Структура процедури хешування інформації включає такі етапи:

Етап 1. Формування контрольного ядра (вхідна інформація).

Етап 2. Операція хешування за допомогою алгоритму.

Алгоритм послідовного хешування з використанням логічних операцій використовує послідовне застосування обраних спеціальним чином логічних операцій до пар значень розрядів, один з яких є розрядом рядка хеша, а інший – розрядом хешуючого рядка.

У даному варіанті алгоритму номер кожної наступної логічної операції визначається за формулою:

$$I_k = (I_{k-1} + 1 + t_k)^{\mathrm{mod}\,8}, \quad (1)$$

де $I_k$ – номер наступної логічної операції, $I_{k-1}$ – сума попереднього номера логічної операції, $t_k$ – значення поточного оброблюваного розряду хешуючого рядка.

Недоліком такого підбору номера логічної операції є легка прогнозованість цього номера для кожного розряду хешуючого і пов'язаного рядка. Іншим його недоліком є необхідність зберігання номера попередньої застосованої логічної операції, що незручно при розпаралелюванні процесу обчислення хеша за даним алгоритмом і перешкоджає застосуванню для прискореного обчислення хеша рядка, для якого відомий хеш його початкової частини.

Для виключення цих недоліків запропоновано наступний порядок вибору номера чергової застосовуваної логічної операції:

$$I_i = (|\, \underline{h}_i \underline{h}_{i+1} \underline{h}_{i+2} \,| + i + \underline{t}_k)^{\mathrm{mod}\,8}, \quad (2)$$

де $i$ – номер розряду оброблюваного рядка хеша, $\underline{h}_i$ – значення $i$-го розряду рядка хеша, $\underline{t}_k$ – значення оброблюваного розряду хешуючого рядка, а $|\underline{h}_i\ \underline{h}_{i+1}\ \underline{h}_{i+2}|$ – число, представлене трьома значеннями розрядів хеша.

При використанні цього алгоритму розпаралелювання не повинно зменшувати інтервали між одночасно оброблюваними розрядами рядка хеша менш ніж до трьох розрядів.

Для прискорення алгоритму формула може бути простішою:

$$I_i = (|\, h_1 h_2 h_3 \,| + i + |\, h_i \,|)^{\mathrm{mod}\,8} \quad (3)$$

Хешування за допомогою псевдовипадкового рядка полягає в наступному: чергове наближення бінарного рядка хеша $H_{i+1}$ довжиною в до розрядів $(h_1\text{-}h_k)$ отримують з попереднього наближення $H_i$ складанням по модулю $2^k$ або побітовим складанням (XOR) з рядком довжиною в $k$ розрядів.

$$H_1 = (H_0 + d_1) \bmod 2^k = (d_0 + d_1)^{\mathrm{mod}\,8^k}, \quad (4)$$

де $k$ – число розрядів хеша (довжина хеша), $d_i$ – відрізки псевдовипадкового бінарного рядка по $k$ розрядів, які обираються за заданим алгоритмом, $H_i$ – $i$-е наближення хеша, $k$ – число розрядів хеша (довжина хеша).

Для варіанту з використанням побітового складання (XOR):

$$H_1 = H0 \ \vee\ \mathrm{d}_1 = d_0 \vee d_1 \quad (5)$$

Аналогічно, враховуючи, що

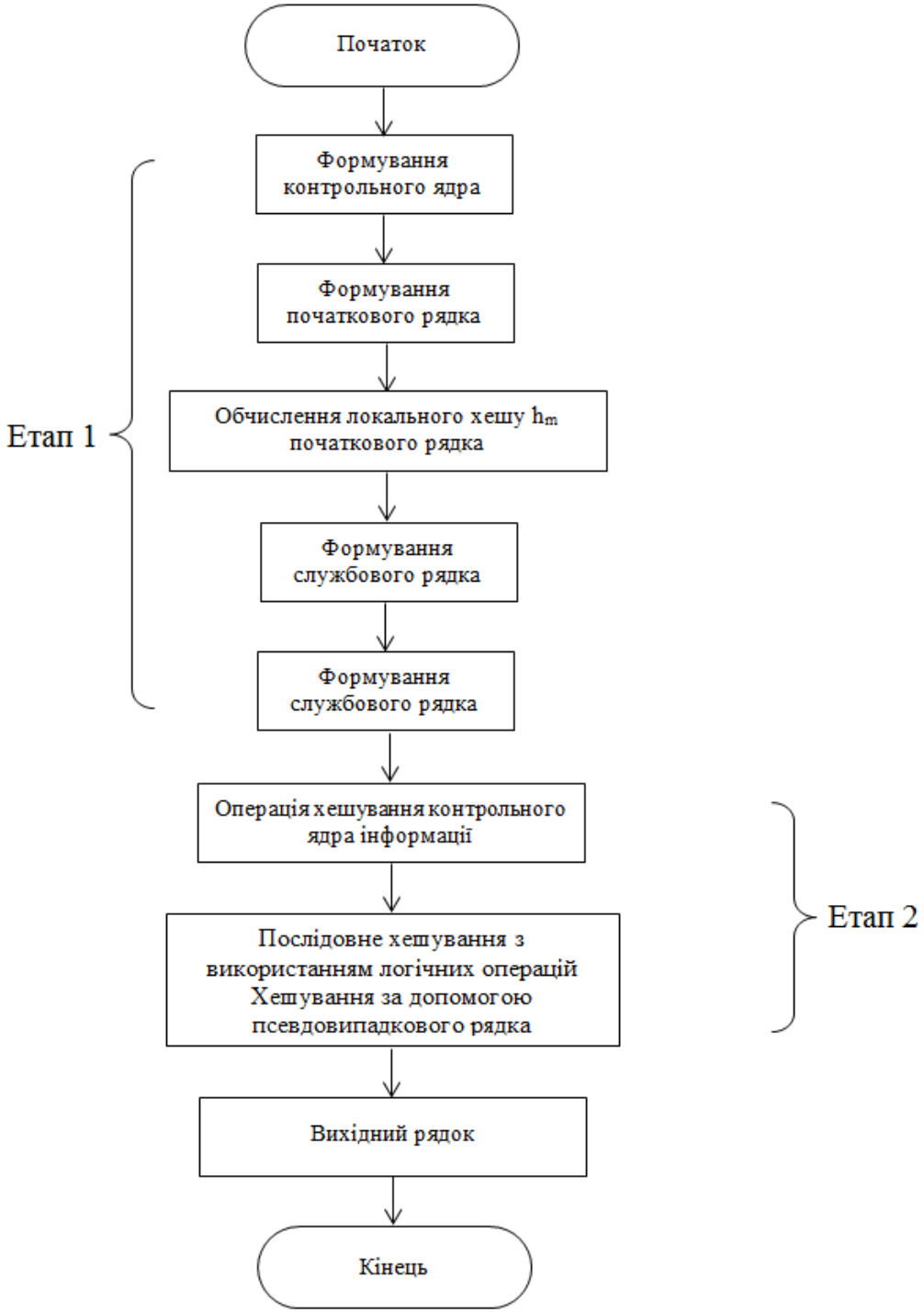



**Рис. 1. Блок-схема загального принципу хешування інформації**

$$N_i = | m | + | p_1 | + | p_2 | + ... + | p_i |, \quad (6)$$

де $|m|$ – модуль бінарного рядка, *pi* – блоки по *r* розрядів, на які розбитий рядок *m*.

Отримуємо для *i* наближення:

$$H_1 = (H_i - 1 + d_i)^{\bmod 2^k} = (d_0 + d_1 + ... + d_i - 1 + d_i)^{\bmod 2^k} \quad (7)$$

або при використанні побітового складання (для варіанту з XOR):

$$H_1 = H_{i-1} \vee d_i = d_0 \vee d_1 \vee ... \vee d_i - 1 \vee d_i \quad (8)$$

Останній варіант, звичайно, швидше, тому що XOR швидше складається.

**Висновки**

Представлений новий метод, який використовує алгоритми хешування з використанням логічних

операцій і з використанням псевдовипадкового рядка, має широкий потенціал застосування в різних областях діяльності: державної, громадської, фінансової, юридичної, виробничої, інформаційної, технічної.

Даний метод контролю цілісності даних дозволяє використовувати його для контролю цілісності:

інформації, що зберігається як в локальних, так і в глобальних БД;

інформації, що не поміщена в БД, в т.ч. не поміщена в базу даних, в якій зберігається контрольне ядро або його частина;

інформації, про яку при реєстрації відомий тільки її хеш;

інформації, що не зберігається взагалі (наприклад, інформації, яка була видалена після реєстрації);

будь-якої інформації вираженої в символьній формі.

**Література**

1. Петров А. А. Компьютерная безопасность. Криптографические методы защиты / А. А. Петров. – Москва, 2013. – С. 448–452.

2. Лёвин В.Ю. О повышении криптостойкости однонаправленных хеш-функций. Фундаментальная и прикладная математика / Лёвин В.Ю. – Москва, 2010. – С. 171–179.

3. Фергюсон Н. Практическая криптография / Фергюсон Н., Шнайер Б. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2011. – С. 101–114.

4. Панасенко С.П. Словарные атаки на хэш-функции. Мир и безопасность / Панасенко С.П. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 24–31.

5. Ященко В.В. Введение в криптографию / Ященко В.В. – Москва : МЦНМО, 2012. – С. 348–350.

**References**

1. Petrov A. A. Kompyuternaya bezopasnost. Kriptograficheskie metody zashity / A. A. Petrov. – Moskva, 2013. – S. 448–452.

2. Lyovin V.Yu. O povyshenii kriptostojkosti odnonapravlennyh hesh-funkcij. Fundamentalnaya i prikladnaya matematika / Lyovin V.Yu. – Moskva, 2010. – S. 171–179.

3. Fergyuson N. Prakticheskaya kriptografiya / Fergyuson N., Shnajer B. – Moskva : Izdatelskij dom «Vilyams», 2011. – S. 101–114.

4. Panasenko S.P. Slovarnye ataki na hesh-funkcii. Mir i bezopasnost / Panasenko S.P. – Sankt-Peterburg, 2010. – C. 24–31.

5. Yashenko V.V. Vvedenie v kriptografiyu / Yashenko V.V. – Moskva : MCNMO, 2012. – C. 348–350.

Рецензія/Peer review : 5.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-199-203
УДК 621.398.96

В.І. КОРСУН
Державний університет телекомунікацій

# ПРОЦЕДУРА ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МОБІЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ РАДІОМОНІТОРИНГУ ІЗ АПРІОРНО ВИЗНАЧЕНОЮ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ЇЇ РУХОМИХ РАДІОПРИЙМАЧІВ

*В роботі обґрунтована актуальність вирішення низки завдань щодо визначення джерел завадового радіовипромінювання в умовах нерегулярного використання радіочастотного ресурсу. Запропонована процедура виявлення і розпізнавання завадового (несанкціонованого) випромінювання за рахунок використання мобільних систем із апріорно визначеною просторово-часовою конфігурацією її рухомих радіоприймачів. Дана процедура на відміну від існуючих, побудована на небайєсовських правилах прийняття рішень та може бути використана в ході вирішення завдань виявлення та розпізнавання несанкціонованих джерел радіовипромінювань в умовах складної електромагнітної обстановки.*

*Ключові слова: виявлення, розпізнавання, радіозавада, радіомоніторинг, просторово-часова конфігурація.*

V.I. KORSUN
State University of Telecommunications

## PROCEDURE FOR DETERMINING AND RECOGNIZING NONSANCED RADIATION BY MOBILE SYSTEMS OF RADIO MONITORING WITH AREA-SPECIFIC SPACIAL-TIME CONFIGURATION OF ITS MOVING RADIO RECEIVERS

*The paper substantiates the relevance of the solution of a number of tasks concerning the determination of the sources of harmful radio emission in conditions of irregular use of the radio frequency resource. The procedure for detection and recognition of interference (unauthorized) radiation by the use of mobile systems with a priori determined spatio-temporal configuration of its mobile radio receivers is proposed. This procedure, in contrast to existing ones, is based on non-Bayesian decision-making rules and can be used to solve the problems of detecting and recognizing unauthorized sources of radio emission under conditions of complex electromagnetic environment. When solving the problems of detecting and recognizing radio emission, an adequate probabilistic model of a priori known signals should be selected, which should reflect their properties of the real physical signal at the output of the radio, tuned to the given radio emission. In this case, the algorithms for detecting and recognizing radio waves on the basis of the considered rules can be specified, taking into account the type of distribution density, which are determined by the selected probabilistic model of signals. In the problems of detecting and recognizing radiofrequencies, there is a priori uncertainty, when unknown parameters of the distribution density of the corresponding signals, or in general, an unknown type of distribution density. This determines the need for accumulation of training signal samples to overcome a priori uncertainty. These samples should be evaluated for unknown parameters of radiation for further application of this information in the considered algorithms of detection and recognition.*

*Keywords: detection, recognition, radio interference, radio monitoring, spatial-temporal configuration.*

**Вступ. Постановка завдання.** В умовах сучасної електромагнітної обстановки значно ускладнюється задача пошуку радіозавад, джерела яких маскуються нерегулярним характером використання радіочастотного ресурсу.

Ідентифікація джерел радіовипромінювання за даними ідентифікаторів мережі і окремих базових станцій/секторів дозволяє реалізувати більш детальний аналіз спектру сигналів в оточуючому середовищі і виявляти сигнал завади від несанкціонованого джерела.

Для ефективного пошуку джерела завади необхідно зменшувати загальну невизначеність у параметрах випромінювання передавачів мережі за рахунок використання додаткової інформації щодо випромінювання джерела завади, отриманої від заявника, і також шляхом попереднього вимірювання у місці проявів завади.

За рахунок підвищення потужності сигналу завади у порівнянні з потужністю корисного сигналу в приймачі радіоконтролю виникає можливість прицільного, більш детального аналізу спектру сигналу завади і, таким чином, забезпечення більшої точності і надійності результатів аналізу його спектру.

Пошук джерела завади в умовах нерегулярного використання радіочастотного ресурсу є складним і актуальним завданням.

Відомо [1–9], що мобільні засоби моніторингу із багатоканальним прийомом спроможні функціонально доповнювати стаціонарні й забезпечувати гнучку підтримку ефективного радіоконтролю під час проведення вимірювань параметрів випромінювань і виявлення джерел радіозавад [1–13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Припустимо, що з *M*-елементного антенно-приймального блоку системи радіомоніторингу із апріорно визначеною просторово-часовою конфігурацією рухомих радіоприймачів, розташованих в декількох пунктах прийому (рис. 1), знімається сукупність *M* значень напруги, які є функціями часу $y_1(t), y_2(t), \ldots, y_M(t)$ і утворюють вектор-стовпець вхідних впливів [3, 4]:

$$\vec{y}(t)=\begin{Vmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ ..... \\ y_M(t) \end{Vmatrix}=\vec{y}^T(t)=\begin{Vmatrix} y_1(t) & y_2(t) & ..... & y_M(t) \end{Vmatrix}$$

де $T$ – операція транспонування.

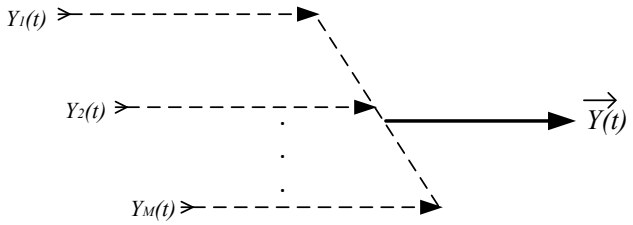



**Рис. 1. *M*-елементний антенно-приймальна блок мобільної системи радіомоніторингу із апріорно визначеною просторово-часовою конфігурацією рухомих приймачів радіовипромінювання**

Реалізація прийнятих коливань $\overrightarrow{y(t)}$ може бути обумовлена або одними завадами, або накладенням сигналів і завад:

$$\vec{y}(t)=\vec{n}\left(t,\vec{\lambda}_1\right)+A\vec{x}\left(t,\vec{\alpha},\vec{\lambda}_2\right), \tag{1}$$

де $\vec{n}\left(t,\vec{\lambda}_1\right), A\vec{x}\left(t,\vec{\alpha},\vec{\lambda}_2\right)$ – векторні реалізації завади і сигналу відповідно;

$A=(1,0)$ – множник, який враховує наявність ( $A=1$ ) або відсутність ( $A=0$ ) сигналу в векторі $\vec{y}(t)$;

$\vec{\alpha}$ – вектор інформативних параметрів сигналу;

$\vec{\lambda}_2$ – вектор неінформативних параметрів сигналу;

$\vec{\lambda}_1$ – вектор випадкових параметрів зовнішньої завади.

Багатоканальний виявлювач реалізує оцінку дискретного параметру:

$$\hat{A}\left[\vec{y}(t)\,|\,\vec{\alpha},\vec{\lambda}\right]=\begin{cases}1(\text{"так"}),\\ 0(\text{"ні"}),\end{cases} \tag{2}$$

яка є функціоналом реалізації прийнятих коливань $\overrightarrow{y(t)}$ .

Перед оптимізацією 2-альтернативного виявлення реалізуємо дискретизацію прийнятих коливань як функцій часу. Це дозволить: перейти від випадкових функцій $\overrightarrow{y(t)}$ до випадкових багатовимірних величин; ввести щільності ймовірності прийнятих реалізацій як функції багатьох змінних; дискретизація в часі набуває самостійного значення при переході до цифрової обробки сигналів.

Припустимо, що кожна із скалярних функцій $y_i(t)$ містить $L$ часових дискретів. Тоді загальна кількість діскретів при $M$-канальному прийомі, $i = 1, 2, ..., M,$ складатиме $m = LM$.

В цьому випадку рішення приймається за $m$-мірним рядком (стовпцем):

$$\vec{y}^T(t)=\begin{Vmatrix} y_1(t) & y_2(t) & ..... & y_M(t) \end{Vmatrix} \tag{3}$$

В даному випадку вирішуючий функціонал (2) переходить у вирішальну функцію $m$ скалярних змінних:

$$\hat{A}\left[\vec{y}(t)\,|\,\vec{\alpha},\vec{\lambda}\right]=\begin{cases}1\\ 0\end{cases} \tag{4}$$

Слід відзначити, що класичні задачі виявлення і розпізнавання сигналів неадекватні реальним завданням радіомоніторингу. У багатьох випадках виникає необхідність виявляти і розпізнавати сигнали з невідомими статистичними характеристиками. Для подолання апріорної невизначеності під час виявлення і розпізнавання можуть бути використані навчальні вибірки реальних сигналів і завад [2, 3, 4, 13].

Однак, специфіка завдань радіомоніторингу така, що доводиться вирішувати завдання виявлення і розпізнавання радіовипромінювань (РВ) за відсутності для них навчальних вибірок.

Методика розпізнавання (багатоальтернативного виявлення) заданих сигналів за наявності класу невідомих сигналів, які адекватні реальним задачам радіомоніторингу.

В деякому $M$-елементному антенно-приймальному блоці системи радіомоніторингу із апріорно визначеною просторово-часовою конфігурацією рухомих радіоприймачів, розташованих в декількох пунктах прийому, спостерігаються сигнали на тлі завад.

З усієї безлічі сигналів, що з'являються у визначеній багатоканальній системі, потрібно виділити і розпізнати $N$ заданих сигналів, які представляють інтерес для завдань радіомоніторингу.

При цьому фактично необхідно виявити, розділити і розпізнати $N$ заданих сигналів, а також віднести у ($N$+1)-й клас сигнали, які не становлять інтерес для радіоконтролю.

У деяких випадках моніторингу, при появі сигналів із ($N$+1)-го класу, приймається рішення про те, що з'явилися нові невідомі радіовипромінювання, які підлягають подальшому аналізу з метою визначення виду і параметрів модуляції.

Приймається, що в $M$-елементному приймальному блоці системи діє або один із заданих сигналів $x^i(t)$, або новий невідомий сигнал в адитивній суміші з завадою *n(t)*:

$$y(t) = x^i(t) + n(t), i = \overline{1, N+1},$$

де $x^i(t)$ – сигнал, який визначається переданим повідомленням, видом оператора модуляції, видом і параметрами сигналу-переносника, типом кодування повідомлень.

В ході автоматизованого радіоконтролю для ряду апріорно відомих радіовипромінювань відомі вид і параметри модуляції, вид кодування, імовірнісні характеристики повідомлення.

Якщо вони невідомі, то така інформація може бути отримана шляхом додаткових досліджень з використанням навчальних вибірок реальних сигналів для заданих РВ.

Для безлічі інших радіовипромінювань, які не представляють інтересу для радіомоніторингу і об'єднуються в ($N$+1)-й клас невідомих РВ, імовірнісний опис відповідних їм сигналів невідомий і відсутні їх навчальні вибірки сигналів.

Припустимо, що невідомі радіовипромінювання відрізняються від $N$ апріорно заданих.

Таким чином, по відношенню до радіовипромінювань, які спостерігаються в $M$-канальній системі моніторингу, можна прийняти рішення на користь однієї з гіпотез:

$H^i : y(t) = x^i(t) + n(t), i = \overline{1, N}$ — діє одне із $N$ заданих радіовипромінювань; (5)

$H^{N+1} : y(t) = x^i(t) + n(t), i = \overline{1, N+1}$ — діє одне із( $N$+1*)* невідомих радіовипромінювань. (6)

Приймається, що в $M$-канальній системі спостереження сигнали відповідних класів надходять послідовно в часі, тобто на інтервалі моніторингу (0, Тм) може діяти тільки один із сигналів з ймовірністю появи *Pi,* при цьому:

$$\sum_{i=1}^{N+1} P_i = 1$$

Ця задача фактично являє собою задачу розпізнавання заданих сигналів за наявності ($N$+1)-го класу невідомих сигналів. У цьому завданні ймовірність помилкових рішень складається з трьох складових, що визначаються відповідно:

*Рпом (N)* – переплутування $N$ заданих сигналів між собою;

*Рпом (N*+1*/N)* – прийняття гіпотези $H^{N+1}$ у разі, коли діє один з $N$ заданих сигналів;

*Рпом (N/N*+1*)* – прийняття гіпотези про дію одного з $N$ заданих сигналів, за умови, що діє сигнал з ($N$+1*)*-го класу.

За рахунок наявної апріорної інформації можливо контролювати лише перші дві складові ймовірності помилки.

Для обліку третьої складової можна вводити показник у вигляді обсягу критичної області відхилення гіпотези $H^{N+1}$ про дію ($N$+1)-класу сигналів.

$$K = \bigcup_{i=0}^{N} K_i$$

Дана область має сенс власної області $N$ заданих сигналів і завад.

Для вирішення завдання розрізнення (розпізнавання) $N$ заданих сигналів запропоновано ввести векторний критерій якості, який враховує зазначені складові ймовірності помилки.

При цьому в роботі вирішене завдання максимізації сумарної імовірності правильного розпізнавання $N$ заданих сигналів при фіксовану обсязі їх власної області.

Вирішення цього завдання призвело до отримання правила:

$$H^i : \max\left[\left(P_l \omega\left(y / x^l\right)\right)\right] \geq \lambda \quad (7)$$

$$l = \overline{1, N}$$

$$P_i \omega\left(y / x^i\right) \geq_l \omega\left(y / x^l\right), l = \overline{1, N}, l \neq i \quad (8)$$

$$H^{N+1} : \max\left[\left(P_i \omega\left(y / x^l\right)\right)\right] < \lambda \quad (9)$$

$$l = \overline{1, N}$$

При виконанні (7), (8) приймається рішення про дію одного з $N$ заданих сигналів. Коли виконується

(9), приймається рішення про дію невідомого сигналу з ($N$+1)-го класу.

Це вирішальне правило відноситься до класу небайєсовських правил прийняття рішень [12]. Воно дає можливість вирішувати завдання розпізнавання радіовипромінювання в багатоканальній системі радіомоніторингу, як нове завдання селекції і розрізнення сигналів.

У випадку, коли враховуються помилки лише за рахунок переплутування ($N$+1)-класу сигналів із $N$-відомими сигналами можна прийти до прийняття однієї з двох гіпотез:

$$H^N : \max\left[\left(P_i\omega\left(y / x^l\right)\right)\right] \geq \lambda; \; H^{N+1} : \max\left[\left(P_i\omega\left(y / x^l\right)\right)\right] < \lambda$$
$$l = \overline{1,N} \qquad\qquad l = \overline{1,N} \tag{10}$$

Вище наведені вирази являють собою вирішальне правило виявлення невідомих радіовипромінювань на тлі стаціонарної завади.

При цьому приймається рішення про те, що в $M$-канальній системі спостереження на тлі стаціонарної завади діє або нове радіовипромінювання, або одне із $N$ апріорно відомих.

**Висновки**

1. При вирішенні розглянутих завдань виявлення і розпізнавання радіовипромінювань повинна бути обрана адекватна імовірнісна модель апріорно відомих сигналів, яка повинна відображати їх властивості реального фізичного сигналу на виході радіоприймача, налаштованого на задане радіовипромінювання.

При цьому алгоритми виявлення і розпізнавання радіовипромінювань на основі розглянутих правил можуть бути конкретизованими з урахуванням виду щільності розподілення, які визначаються обраною ймовірнісною моделлю сигналів.

2. В задачах виявлення і розпізнавання радіовипромінювань має місце апріорна невизначеність, коли невідомі параметри щільності розподілу відповідних сигналів або взагалі невідомий вид щільності розподілу. Це визначає необхідність накопичення навчальних вибірок сигналів для подолання апріорної невизначеності. За цими вибірками повинні знаходитися оцінки невідомих параметрів випромінювань для подальшого застосування цієї інформації в розглянутих алгоритмах виявлення і розпізнавання.

**Література**

1. Безрук В.М. Обнаружение и распознавание сигналов в условиях априорной неопределенности при автоматизированном радиомониторинге / В.М. Безрук, С. А. Иваненко // РИ. – 2018. – № 3. – С. 8–12.

2. Методика визначення місцезнаходження джерел радіозавад в умовах пасивної локації [Електронний ресурс] / В.А. Дружинін, В.І. Корсун, К.А. Соколов, Ю.М. Бойко, О.Ю. Богомол // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 3. – С. 82–91. – Режим доступу : http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7606.

3. Дружинін В. А. Проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення : монографія / В. А. Дружинін. – Київ : Логос, 2013. – 230 с.

4. Методи та алгоритми обробки і захисту інформації в радіолокаційних системах із змінною просторовою конфігурацією : монографія / [В. А. Дружинін, С.В. Толюпа, В.С. Наконечний, Н.В. Цьопа, Є.В. Батрак]. – Київ : Логос, 2014. – 251 с.

5. Hayes M.P., Gough P.T. Synthetic aperture sonar: a review of current status // IEEE J. Ocean. Eng. 2009. V. 34. № 3. P. 207–224.

6. Autrey S.W. Passive synthetic arrays // IEEE J. Ocean. Eng. 1988. V. 84. № 2. P. 592–598.

7. Stergiopoulos S. Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture // The Journal of the Acoustical Society of America. 1990. V. 87, № 5. P. 2128–2140.

8. Edelson G.S., Tufts D.W. On the ability to estimate narrow-band signal parameters using towed arrays // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. V. 17, № 1. P. 48–61.

9. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Cramer–Rao lower bound for localization of a source with partial temporal coherence using passive synthetic aperture // Proc. of the 12th European Conference on Underwater Acoustics. 2012. Edinburgh, United Kingdom. P. 564–571.

10. I.R. Parhomey, J.M. Boiko and O.I. Eromenko (2016, Aug.). Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2(77): 75–84. DOI: 10.5604/17348412.1230101.

11. Пархомей І. Р. Особливості функціонування радіолокаційних систем локації об'єктів з низькою поверхнею віддзеркалення [Електронний ресурс] / І. Р. Пархомей, Ю. М. Бойко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 194–201. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_5_39.

12. Parkhomey I. Identification information sensors of robot systems / I. Parkhomey, J. Boiko, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Vol.14, nr. 3. – P. 1235–1243. DOI: 10.11591/ijeecs.v14.i3.pp1235-1243.

13. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завад [Електронний ресурс] : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с. – Режим доступу : http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7556.

**References**

1. Bezruk V.M. Obnaruzhenie i raspoznavanie signalov v usloviyah apriornoj neopredelennosti pri avtomatizirovannom radiomonitoringe / V.M. Bezruk, S. A. Ivanenko // RI. – 2018. – № 3. – S. 8–12.

2. Method for determining the location of sources of radio interference in passive location / V.A. Druzhinin, V.I. Korsun, K.A. Sokolov, J.M. Boiko, O.Yu. Bohomol // Herald of Khmelnytskyi National University : scientific journal. Technical Sciences. – Khmelnytskyi, 2019. – Issue 3. – P. 82–91. – URL : http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7606.

3. Druzhynin V. A. Problemy formuvannia ta obrobky radiolokatsiinoi informatsii v systemakh radiobachennia : monohrafiia / V.A. Druzhynin. – Kyiv : Lohos, 2013. – 230 s.

4. Metody ta alhorytmy obrobky i zakhystu informatsii v radiolokatsiinykh systemakh iz zminnoiu prostorovoiu konfihuratsiieiu : monohrafiia / [V. A. Druzhynin, S.V. Toliupa, V.S. Nakonechnyi, N.V. Tsopa, Ye.V. Batrak]. – Kyiv : Lohos, 2014. – 251 s.

5. Hayes M.P., Gough P.T. Synthetic aperture sonar: a review of current status // IEEE J. Ocean. Eng. 2009. V. 34. № 3. P. 207–224.

6. Autrey S.W. Passive synthetic arrays // IEEE J. Ocean. Eng. 1988. V. 84. № 2. P. 592–598.

7. Stergiopoulos S. Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture // The Journal of the Acoustical Society of America. 1990. V. 87, № 5. P. 2128–2140.

8. Edelson G.S., Tufts D.W. On the ability to estimate narrow-band signal parameters using towed arrays // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. V. 17, № 1. P. 48–61.

9. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Cramer–Rao lower bound for localization of a source with partial temporal coherence using passive synthetic aperture // Proc. of the 12th European Conference on Underwater Acoustics. 2012. Edinburgh, United Kingdom. P. 564–571.

10. I.R. Parhomey, J.M. Boiko and O.I. Eromenko (2016, Aug.). Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2(77): 75–84. DOI: 10.5604/17348412.1230101.

11. Parhomey I.R. Features of objects radar systems ranging from low reflection surface / I.R. Parhomey, J.M. Boiko // Herald of Khmelnytskyi National University : scientific journal. Technical Sciences. – Khmelnytskyi, 2015. – № 5. – P. 194–201. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_5_39.

12. Parkhomey I. Identification information sensors of robot systems / I. Parkhomey, J. Boiko, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Vol.14, nr. 3. – P. 1235–1243. DOI: 10.11591/ijeecs.v14.i3.pp1235-1243.

13. Naukovo-prykladni pytannja zabezpechennja rozdiljnoji zdatnosti i efektyvnosti obrobky syghnaliv u radiotekhnichnykh ta telekomunikacijnykh systemakh za najavnosti zavad : monohrafiia / J. Boiko, O. Shynkaruk, L. Karpova, I. Chesanovskyi. – Khmelnytskyi : KhNU, 2019. – 218 s. – URL : http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7556.

Рецензія/Peer review : 6.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-204-208
УДК 043.3

В.П. КВАСНІКОВ, А.Л. ПЕРЕДЕРКО, Л.В. КУЗЬМИЧ
Національний авіаційний університет
В.Ю. КОТЕТУНОВ
Національний транспортний університет

# ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПРИЛАДОВИМИ СИСТЕМАМИ (В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ)

*Дана стаття присвячена вимірюванню механічних величин. Запропоновані методи спрямовані на механічні величини інтелектуальних приладів системи (в умовах невизначеності). Обґрунтовано підходи до обробки результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами, зокрема оцінювання точності вимірювань в умовах невизначеності.*

***Ключові слова:*** *механічні величини, похибка, невизначеність вимірювання, середнє квадратичне відхилення.*

V.P. KVASNIKOV, A.L. PEREDERKO, L.V. KUZMICH
National Aviation University, Kyiv
V. U. KOTETUNOV
National Transport University, Kyiv

## PROCESSING OF RESULTS OF MEASUREMENT OF MECHANICAL VALUES BY INTELLECTUAL EQUIPMENT SYSTEMS (UNDERSTANDING CONDITIONS)

*This article is devoted to the measurement of mechanical quantities. The proposed methods are directed to the mechanical values of the intellectual devices of the system (in conditions of uncertainty). At the present stage of the development of intellectual systems, the issue of creating methods for rapid processing of the obtained results, determining the accuracy of their measurement in real time, in particular in solving management problems and making decisions under uncertainty, remains an issue. The result of the measurement of mechanical quantities, in particular the cost of thermal energy by intelligent instrumentation systems (IPS), is complete, provided that it is accompanied by an estimate of its accuracy [1]. The processing accuracy of the measurement results depends on the type of measurement, the number of experimental data, the accuracy requirements of the measurement, and so on. Only during direct one-time measurements the result of the study may be the result of the measurement (provided that the systematic errors of measurement are not corrected). In other measurements, processing can be done using standardized techniques (eg statistical methods), or require the creation of special algorithms. Each type of measurement has its own characteristics and therefore the specific content of these operations of processing the results of a particular type of measurement has certain differences. The approaches to processing the results of measurement of mechanical quantities by intelligent instrumental systems, in particular estimating the accuracy of measurements under uncertainty, are substantiated.*

***Key words:*** *mechanical values, error, uncertainty of measurement, mean square deviation.*

## Вступ

На сучасному етапі розвитку інтелектуальних систем актуальним залишається питання створення методів швидкої обробки отриманих результатів, визначення точності їх вимірювання в реальному часі, зокрема в ході розв'язування задач управління та прийняття рішень в умовах невизначеності.

Результат вимірювання механічних величин, зокрема витрат теплової енергії інтелектуальними приладовими системами (ІПС), є повноцінним за умови, що він супроводжується оцінюванням його точності [1].

Обсяг обробки результатів точності вимірювання залежить від різновиду вимірювання, кількості експериментальних даних, вимог щодо точності вимірювання тощо. Лише під час прямих разових вимірювань отриманий результат дослідження може бути результатом вимірювання (за умови, що систематичні похибки вимірювання не коригують). В інших вимірюваннях обробка може здійснюватися за стандартизованими методиками (наприклад статистичними методами), або вимагати створення спеціальних алгоритмів.

У загальному випадку обробка передбачає такі етапи [2, 3, 4]:

попередній аналіз результатів спостережень (первинних вимірювань), їх систематизація відкидання явно недостовірних результатів;

корекція впливу систематичних ефектів (вивчення умов вимірювань, розрахунок і внесення поправок);

аналіз впливу випадкових ефектів, перевірка гіпотез про їх розподіл, вибір найкращих оцінок шуканих величин;

оцінювання характеристик точності числового алгоритму, його стійкості;

виконання розрахунків згідно з вибраним алгоритмом;

аналіз отриманих результатів;

подання результатів вимірювань та характеристик їх точності за відповідною формою.

Кожен вид вимірювань має свої особливості і тому конкретний зміст зазначених операцій обробки результатів конкретного виду вимірювання має певні відмінності.

**Експериментальна частина**

Практична корисність будь-якого вимірювання визначається зазначенням його похибки, тобто кількісної характеристики відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної механічної величини.

У вітчизняних нормативних документах для оцінювання точності вимірювань зберігається традиційний підхід, що ґрунтується на понятті "похибка вимірювань" [5]. Традиційний аналітичний підхід до визначення похибок полягає в поділі їх на складові, кожна з яких зумовлена певними факторами. Це дозволяє досліджувати джерела складових похибки, проводити необхідні експерименти, в тому числі допоміжні вимірювання, і, як наслідок, визначити властивості похибки та з необхідною точністю оцінити її складові. Знаючи властивості й оцінки складових, можна правильно врахувати їх при оцінці повної похибки, а також при необхідності ввести поправку в результат вимірювання або організувати вимірювальний експеримент так, щоб звести окремі складові, а з ними й повну похибку, до допустимого значення. Так, зокрема, при вимірюванні витрат теплової енергії інтелектуальними приладовими системами похибка вимірювання має не перевищувати ±5%.

Для підвищення об’єктивності оцінки похибок вимірювань механічних величин і визначення шляхів їхнього зменшення, з метою покращання якості вимірювань, необхідно дослідити можливі причини виникнення різних складових повної похибки вимірювань і закономірності їх змінювання.

Новий підхід рекомендується МКМВ, МОЗМ, Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) та іншими міжнародними організаціями, що ґрунтується на оцінюванні точності вимірювань за допомогою поняття «невизначеність вимірювань» [5–7].

Уперше концепція невизначеності з'явилась у відповідь на появу нових, нетрадиційних об'єктів вимірювання сфер вимірювання (аналітичної хімії, психології, соціології, педагогіки, медицини тощо); прагнення усунути слабкі місця концепції похибки результату вимірювання; вплив нових наукових напрямів (кібернетики, теорії інформації, теорії прийняття рішень, теорії нечітких множин); розробка математичної моделі вимірювання, що відповідає сучасним тенденціям розвитку теорії вимірювань. У роботі L. Finkelstein «Theory and Philosophy of Measurement» запропоновано концепцію невизначеності як один із напрямів розвитку теорії вимірювань [8].

Розроблена вченими світу теорія невизначеності зумовила появу документа Міжнародної організації стандартизації ISO «Guide to Expression of Uncertainty in Measurement», виданого 1993 р. [9].

Головні відмінності концепції невизначеності від концепції похибки результату вимірювання наступні: відхід від поняття істинне значення вимірюваної величини як такого, що не піддається пізнанню; у зв'язку з останнім поняття похибки вимірювання як відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини втрачає сенс; невизначеність результату вимірювання характеризуються чи середнім квадратичним відхиленням (СКВ), чи симетричними границями, тому всі систематичні похибки підлягають корекції, а їх невилучені залишки входять до розсіювання результату вимірювання; у зв'язку з останнім недоцільним є сенс розподіл похибок результату вимірювання на систематичні і випадкові; залишається тільки розподіл компонентів невизначеності на компоненти категорії А і компоненти категорії В за способом їх оцінювання.

Між двома концепціями (невизначеності результату вимірювання і похибки результату вимірювання) є суттєві відмінності, які треба враховувати, складаючи методики обробки даних вимірювань і подаючи кінцевий результат. Але відкидати чи не помічати концепцію невизначеності недоцільно. Це унеможливить гармонізацію вітчизняних і зарубіжних нормативно-технічних документів та уповільнить роботу в нетрадиційних сферах вимірювань.

Метою даної праці є формування методу обробки результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами із застосуванням нового підходу, що базується на теорії невизначеності, для обробки даних і подання результату вимірювання.

**Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** В літературних джерелах з метрології та в міжнародних документах нема досить переконливих обґрунтувань щодо відмови від терміну «похибка» і заміни його новим терміном «невизначеність». Більш того, рекомендовані методи оцінки для відображення кількісних характеристик невизначеності мають або той самий, або дещо модифікований вигляд, як і для похибок, зберігаючи, в основному, фізичний зміст. Тому заміна вказаних термінів обумовлена не принципово якісними, фундаментальними обґрунтуваннями, а асоціативністю їх розуміння. Так, термін «похибка» асоціюється з визначеною величиною, а термін «невизначеність» – з сумнівом, невпевненістю, що нібито більше відображає фізичний зміст результату вимірювання [9–11].

Термін «невизначеність»» означає сумнів, він розширює смисл невизначеності вимірювання в бік сумніву відносно результату вимірювання.

Терміни «істинне значення вимірюваної величини» і «похибка результату вимірювання» не використовують у формуванні групи понять, пов'язаної з результатом вимірювання. Використовують поняття «оцінене значення вимірюваної величини» і «невизначеність».

Невизначеність, за ДСТУ 2681-94, – це оцінка, що характеризує діапазон значень, у якому є істинне значення вимірюваної величини. У керівному документі ISO наведено таке визначення: невизначеність вимірювання – параметр, об'єднаний з результатом вимірювання, що характеризує розсіювання значень

вимірюваної величини.

Невизначеність характеризує розсіювання значень вимірюваної величини. Параметром розсіювання є середнє квадратичне відхилення чи половина ширини інтервалу розсіювання з установленим рівнем довіри. Рівень довіри в цьому випадку дорівнює одиниці [11].

Невизначеність результату вимірювання (НВ) включає багато компонентів. Деякі з них можна охарактеризувати СКВ, отриманим на основі статистичного розподілу результату вимірювань. Решту компонентів можна також охарактеризувати СКВ, але отриманим на основі суб'єктивно визначеного розподілу ймовірностей чи за допомогою іншої інформації [10].

Очевидно, що результат вимірювання є найкращою оцінкою значення вимірюваної величини коли всі складові невизначеності, що виникають у результаті систематичних ефектів, вилучено, наприклад, за допомогою корекції, введення поправки і використання еталонів; невилучені залишки входять до розсіювання результатів вимірювання, і тобто до невизначеності.

Отже, невизначеність вимірювань означає сумнів відносно вірогідності результатів вимірювань.

Для кількісного представлення пропонується три її види: стандартна невизначеність (типи А і В), сумарна стандартна невизначеність і розширена невизначеність.

Компоненти типу А - компоненти НВ, які оцінюють за допомогою статистичного аналізу ряду вимірювань.

Компоненти типу В — компоненти НВ, які оцінюють за допомогою інших операцій.

Стандартна невизначеність (*u)* – це невизначеність результату прямих вимірювань, що виражена через СКВ.

За способом обчислення і представлення розрізняють два типи стандартної невизначеності: тип А і тип В.

Стандартна невизначеність типу А (*uA*) – це невизначеність, яка обчислюється статистичними методами обробки результатів багаторазових вимірювань.

Оцінювання стандартної невизначеності типу А відбувається наступним чином:

1. Якщо кількість дослідів $n < 10$, *uA* не оцінюють. Для $10 \le n < 20$ – якщо закон розподілу ймовірностей невідомий, для оцінювання *uA* приймають рівномірний закон. Якщо $n \ge 20$ – закон розподілу ймовірностей визначають апроксимацією експериментальних даних.

2. Для прямого вимірювання результат визначають як середнє арифметичне отриманих значень, тоді невизначеність за типом *A* обчислюють за формулою:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (1)$$

де $x_i$ – отриманий результат вимірювання;

$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$ – середнє арифметичне результатів вимірювання;

$n$ – кількість проведених вимірювань.

3. Для опосередкованого вимірювання результат визначають за оцінками декількох величин, тоді невизначеність за типом *A* обчислюють для кожної вихідної величини:

- якщо значення величини розподілені за рівномірним законом, за формулою:

$$u_A = \frac{b}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

де *b* – півширина інтервалу (для несиметричного закону розподілу $b = (b+) + (-b)/2$);

- якщо значення величини розподілені за нормальним законом, невизначеність обчислюють як СКВ за формулою:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

У випадку, коли дисперсія результатів врахована у невизначеності, то додатково похибку ІПС враховувати непотрібно, оскільки вона відображена у дисперсії.

Стандартна невизначеність типу В (*uB* ) - це невизначеність, яка обчислюється за деякою апріорною інформацією: даними попередніх вимірювань величин, що входять в рівняння; даними вимірювань, що грунтуються на досвіді експериментатора або загальних знаннях про поведінку відповідних об'єктів і засобів вимірювальної техніки, даними їх повірки, атестування і калібрування; невизначеності констант і довідкових даних тощо. Невизначеність усіх цих даних звичайно відображають границями відхилення результату вимірювання фізичної величини від оцінки її істинного значення. Тому невизначеність вимірювань типу В залежить від закону розподілу можливих значень вимірюваної величини.

Оцінювання стандартної невизначеності типу В відбувається наступним чином:

1. Ґрунтуючись на рівнянні залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки: вимірюваних вихідних величин; не вимірюваних впливових вихідних величин; введених поправок на відомі систематичні похибки; коефіцієнтів і констант; додаткових похибок тощо.

2. Невизначеності усіх вхідних величин оцінюють інтервалами і перетворюють їх у середньоквадратичне відхилення, при цьому закон розподілу їхніх ймовірностей, якщо він невідомий, приймають рівномірним. Формула перерахування інтервальної оцінки у середньоквадратичне відхилення:

$$z = b/t, \quad (4)$$

де $\sigma$ – середньоквадратичне відхилення (СКВ); $b$ – на півширина інтервалу; $t$ – значення функції Лапласа для нормального закону розподілу ймовірностей (або аналог значення функції Лапласа для іншого закону).

Сумарна стандартна невизначеність – це стандартна невизначеність результату непрямих вимірювань. Вона має фізичний зміст дисперсії результату непрямих вимірювань і обчислюється через дисперсії (квадрати стандартних невизначеностей) інших фізичних величин (аргументів), через які визначається шукана фізична величина.

Якщо величини, що входять у рівняння, мають різні одиниці вимірювання, то безпосередньо сумувати інтервальні оцінки невизначеності не можна, їх необхідно звести до безрозмірних величин – середньоквадратичних відхилень згідно із формулою (4), за однакових рівнів довіри $P(\partial)$.

Якщо закон розподілу невідомий, то під час перерахунку інтервальної оцінки в середньоквадратичне відхилення, приймають рівномірний закон, а під час перерахунку СКВ в інтервальну оцінку – нормальний закон. Тобто значення функції Лапласа $t$ або його аналогу обирають таким, щоб забезпечити «запас» невизначеності. Якщо закон розподілу відомий, то коефіцієнт для перерахунку приймають згідно з цим законом.

Оцінювання сумарної стандартної невизначеності відбувається наступним чином:

1. Під час вимірювання показників якості текстильних матеріалів сумарну стандартну невизначеність типу А визначають за формулою для некорельованих величин:

$$u_{CA} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u_B^2(x_i)}, \quad (5)$$

де $f(x_1, x_2, x_i, x)$ – залежність вимірюваної величини від вхідних величин (рівняння вимірювання); $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт), який визначають як часткову похідну рівняння залежності вимірювальної величини за однією з вихідних величин. Коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт) відображає зміну впливу даної вхідної величини на результат вимірювання; $u_A(x_i)$ – стандартна невизначеність за типом $A$ вихідної величини.

2. Сумарну стандартну невизначеність типу $B$ визначають за формулою:

$$u_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u_B^2(x_i) + u_B^2(z_i)}, \quad (6)$$

де $uB(x_i)$ – стандартна невизначеність за типом $B$ величин, що входять у рівняння залежності вимірюваної величини; $uB(z_i)$ – стандартна невизначеність за типом $B$ величин, що не входять у рівняння залежності вимірюваної величини.

Якщо впливовий фактор не входить у рівняння залежності вимірюваної величини, його враховують у невизначеності, але без урахування коефіцієнту впливу (вагового коефіцієнту).

3. Тоді, сумарна стандартна невизначеність:

$$u_C = \sqrt{u_{CA}^2 + u_{CB}^2}, \quad (7)$$

Розширена невизначеність – це величина, що визначає інтервал, у границях якого знаходиться більша частина результатів непрямих вимірювань, які з достатньою підставою можуть бути приписані вимірюваній величині. Розширена невизначеність вимірювань обчислюється через сумарну стандартну невизначеність.

Розширену невизначеність визначають за наступною формулою:

$$U = k \cdot u_C, \quad (8)$$

де $k$ – коефіцієнт охоплення, який залежить від заданого рівня довіри $P(\partial)$ і ефективного числа ступенів волі. Для рівня довіри $P(\partial) = 0{,}95$ за нормального закону розподілу ймовірностей коефіцієнт охоплення $k = 1{,}96$, за рівномірного закону розподілу – $k = 1{,}65$ [11].

**Висновки**

1. Основою статистичних досліджень є результати вимірювань, тобто метрологічні дослідження. В останні роки в теоретичній та практичній метрології виникають зміни, які пов'язані з введенням, в першу чергу, поняття «невизначеність» для оцінювання достовірності результатів вимірювань та засобів вимірювання. Поряд з цим при проведенні деяких метрологічних робіт зберігається використання поняття «похибка». Така подвійність оцінки результатів вимірювань зумовлює досить повільне впровадження невизначеності в метрологічну практику України. Об'єктами дослідження є метрологічні характеристики та методи їх визначення.

2. Термін «невизначеність вимірювання» можна трактувати як параметр, який характеризує розсіювання значень, що включає в себе складові, що викликані систематичними впливами.

3. Невизначеність визначення вимірюваної величини є мінімальною невизначеністю вимірювання. Цей інтервал, який називається вимірюваним значенням величини, може бути представлений одним з його значень.

**Література**

1. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – Київ, 2016. – № 2. – С. 180–184.

2. Про метрологію та метрологічну діяльність : закон України № 113/98-ВР від 11.02.1998 (зі змінами, внесеними згідно із Законом № 762-IV від 15.05.2003, в редакції Закону № 1765-IV від 15.06.2004). [Електронний ресурс]. – Режим доступу : zakon.rada.gov.ua/laws/show/113/98-вр.

3. Захаров И.П. Обработка результатов измерений : уч. пособие / Захаров И.П. – Харьков : Изд-во Нац. ун-та внутренних дел, 2002. – 125 с.

4. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальныхданных при измерениях / Грановский В.А., Сирая Т.Н. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

5. Чалый В.П. Неопределенность и погрешность, их сходство, различие и употребление в разных метрологических процедурах / В.П. Чалый // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. – Вип. 7(56). Невизначеність вимірювання: наукові, нормативні та прикладні аспекти. – 2006. – С. 82–86.

6. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях : [учеб. пособие] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.

7. Мержиєвська В.В. Оцінювання невизначеності вимірювання параметрів автомобільних двигунів під час стендового випробовування / В.В. Мержиєвська // Системи обробки інформації. – Харків, 2008.

8. Паракуда В.В. Еволюція вимог до метрології / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалий // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 3. – С. 56–60.

9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.

10. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT).

11. Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань : технічний звіт EUROLAB / переклад з англ. та науково-технічне редагування: А.В. Абрамов; А.М. Коцюба, В.М. Новіков. – Київ : Євролаб-Україна, 2008. – 2006. – № 1. – 51 с.

**References**

1. Kuzmych L.V. Suchasni tendentsii stvorennia pryladovykh system vymiriuvannia mekhanichnykh velychyn / L.V. Kuzmych // Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy. – Kyiv, 2016. – № 2. – S. 180–184.

2. Pro metrolohiiu ta metrolohichnu diialnist : zakon Ukrainy № 113/98-VR vid 11.02.1998 (zi zminamy, vnesenymy zghidno iz Zakonom № 762-IV vid 15.05.2003, v redaktsii Zakonu № 1765-IV vid 15.06.2004). [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : zakon.rada.gov.ua/laws/show/113/98-vr.

3. Zaharov I.P. Obrabotka rezultatov izmerenij : uch. posobie / Zaharov I.P. – Harkov : Izd-vo Nac. un-ta vnutrennih del, 2002. – 125 s.

4. Granovskij V.A. Metody obrabotki eksperimentalnyhdannyh pri izmereniyah / Granovskij V.A., Siraya T.N. – M. : Energoatomizdat, 1990. – 320 s.

5. Chalyj V.P. Neopredelennost i pogreshnost, ih shodstvo, razlichie i upotreblenie v raznyh metrologicheskih procedurah / V.P. Chalyj // Zbirnik naukovih prac. Sistemi obrobki informaciyi. – Vip. 7(56). Neviznachenist vimiryuvannya: naukovi, normativni ta prikladni aspekti. – 2006. – S. 82–86.

6. Zaharov I.P. Teoriya neopredelennosti v izmereniyah : [ucheb. posobie] / I.P. Zaharov, V.D. Kukush. – Harkov : Konsum, 2002. – 256 s.

7. Merzhyievska V.V. Otsiniuvannia nevyznachenosti vymiriuvannia parametriv avtomobilnykh dvyhuniv pid chas stendovoho vyprobovuvannia / V.V. Merzhyievska // Systemy obrobky informatsii. – Kharkiv, 2008.

8. Parakuda V.V. Evoliutsiia vymoh do metrolohii / V.V. Parakuda, B.D. Kolpak, V.P. Chalyi // Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal. – 2005. – № 3. – S. 56–60.

9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.

10. DSTU-N RMH 43:2006. Metrolohiia. Zastosuvannia «Rukovodstva po vыrazhenyiu neopredelennosty yzmerenyi» (RMH 43:2001, IDT).

11. Nastanova z otsiniuvannia nevyznachenosti vymiriuvannia rezultativ kilkisnykh vyprobuvan : tekhnichnyi zvit EUROLAB / pereklad z anhl. ta naukovo-tekhnichne redahuvannia: A.V. Abramov; A.M. Kotsiuba, V.M. Novikov. – Kyiv : Yevrolab-Ukraina, 2008. – 2006. – № 1. – 51 s.

Рецензія/Peer review : 15.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

**ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ**

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-209-215
УДК 66.088

O. SHUIABOV, A. MALININA, V. DANYLO
State Higher Educational Institution "Uzhhorod National University"
V. CHYHIN
National Lend Forces Academy, Lviv

# SOURCE OF BACTERIOCIDIC ULTRA-VIOLET RADIATION AND FLOW OF NANO-PARTICLES OF ZINC AND COPPER OXIDE FOR APPLICATIONS IN MICROBIOLOGY, MEDICINE AND NANOTECHNOLOGY

*The use of gas-discharge sources of bactericidal ultraviolet radiation in biomedical engineering, such as lamps on vapor or amalgam of mercury, xenon and inert gas halide molecules, has recently received significant development. In addition to the ultraviolet radiation factor in various applications in medicine, biology and agrotechnologies, other factors of the gas discharge that are realized in open sources based on atmospheric pressure air are also important. Thus the characteristics of the source based on the flare corona, whose use for plasma pretreatment of lettuce seeds, showed that the germination of the treated seeds increases by more than 25% after the treatment. Characteristics of an open, overvoltage nanosecond discharge in air at atmospheric pressure between copper electrodes with an ectonic mechanism for introducing copper vapor into the discharge gap. This discharge is a point source of ultraviolet radiation in the spectral range of 200-230 nm. A more detailed study of this discharge revealed that, simultaneously with ultraviolet radiation, it is a source of a stream of copper oxide nanostructures deposited on a glass substrate. Nanostructures based on zinc and copper oxides are characterized by a pronounced antimicrobial effect. Therefore, the development of new methods for the simultaneous production of bactericidal ultraviolet radiation and fluxes of transitional metal nanoparticles, which allow to strengthen the inactivation and antimicrobial properties of gas-discharge air plasma, are of considerable interest for applications in microbiology, medicine and agricultural technologies. This report presents the pulsed plasma-chemical reactor device, the parameters and optical characteristics of the plasma of over-stressed nanosecond discharge between copper and zinc electrodes, and the results of the investigation of nanostructure characteristics of these metals oxides.*

***Keywords**: gas-discharge, ultraviolet radiation, halide molecules, plasma-chemical reactor, copper and zinc electrodes*

O. SHUIABOV, A. MALININA, V. DANYLO
State Higher Educational Institution "Uzhhorod National University"
V. CHYHIN
National Lend Forces Academy, Lviv

**SOURCE OF BACTERIOCIDIC ULTRA-VIOLET RADIATION AND FLOW OF NANO-PARTICLES OF ZINC AND COPPER OXIDE FOR APPLICATIONS IN MICROBIOLOGY, MEDICINE AND NANOTECHNOLOGY**

*The use of gas-discharge sources of bactericidal ultraviolet radiation in biomedical engineering, such as lamps on vapor or amalgam of mercury, xenon and inert gas halide molecules, has recently received significant development. In addition to the ultraviolet radiation factor in various applications in medicine, biology and agrotechnologies, other factors of the gas discharge that are realized in open sources based on atmospheric pressure air are also important. Thus the characteristics of the source based on the flare corona, whose use for plasma pretreatment of lettuce seeds, showed that the germination of the treated seeds increases by more than 25% after the treatment. Characteristics of an open, overvoltage nanosecond discharge in air at atmospheric pressure between copper electrodes with an ectonic mechanism for introducing copper vapor into the discharge gap. This discharge is a point source of ultraviolet radiation in the spectral range of 200-230 nm. A more detailed study of this discharge revealed that, simultaneously with ultraviolet radiation, it is a source of a stream of copper oxide nanostructures deposited on a glass substrate. Nanostructures based on zinc and copper oxides are characterized by a pronounced antimicrobial effect. Therefore, the development of new methods for the simultaneous production of bactericidal ultraviolet radiation and fluxes of transitional metal nanoparticles, which allow to strengthen the inactivation and antimicrobial properties of gas-discharge air plasma, are of considerable interest for applications in microbiology, medicine and agricultural technologies. This report presents the pulsed plasma-chemical reactor device, the parameters and optical characteristics of the plasma of over-stressed nanosecond discharge between copper and zinc electrodes, and the results of the investigation of nanostructure characteristics of these metals oxides.*

***Keywords**: gas-discharge, ultraviolet radiation, halide molecules, plasma-chemical reactor, copper and zinc electrodes*

## Problem statement

The use of gas-discharge sources of bactericidal ultraviolet radiation in biomedical engineering, such as lamps on vapor or amalgam of mercury, xenon and inert gas halide molecules, has recently received significant development [1, 2]. In addition to the ultraviolet radiation factor in various applications in medicine, biology and agrotechnologies, other factors of the gas discharge that are realized in open sources based on atmospheric pressure air are also important.

## Analysis of recent researches and publications

Thus, in [3] the characteristics of the source based on the flare corona, whose use for plasma pretreatment of lettuce seeds, showed that the germination of the treated seeds increases by more than 25% after the treatment. Characteristics of an open, overvoltage nanosecond discharge in air at atmospheric pressure between copper electrodes with an ectonic mechanism for introducing copper vapor into the discharge gap [4]. This discharge is a

point source of ultraviolet radiation in the spectral range of 200–230 nm. A more detailed study of this discharge revealed that, simultaneously with ultraviolet radiation, it is a source of a stream of copper oxide nanostructures deposited on a glass substrate [5]. Nanostructures based on zinc and copper oxides are characterized by a pronounced antimicrobial effect [6, 7]. Therefore, the development of new methods for the simultaneous production of bactericidal ultraviolet radiation and fluxes of transitional metal nanoparticles, which allow to strengthen the inactivation and antimicrobial properties of gas-discharge air plasma, are of considerable interest for applications in microbiology, medicine and agricultural technologies.

**The purpose of the work** is to create the pulsed plasma-chemical reactor device, and to investigate the parameters and optical characteristics of the plasma of over-stressed nanosecond discharge between copper and zinc electrodes, and nanostructure characteristics of these metals oxides.

**Device of gas discharge reactor.**
**Technique and conditions of experiment**

The design of pulsed gas-discharge reactor based on a bipolar overvoltage nanosecond discharge in atmospheric air is shown in Fig.1. Electrodes with a diameter of 5 mm and a length of 30 mm made of zinc or copper were installed in a sealed chamber of a dielectric with a volume of 3 litres. The radius of curvature of the working end part of electrodes was 3 mm. The discharge for all types of electrodes was investigated at atmospheric air pressure.

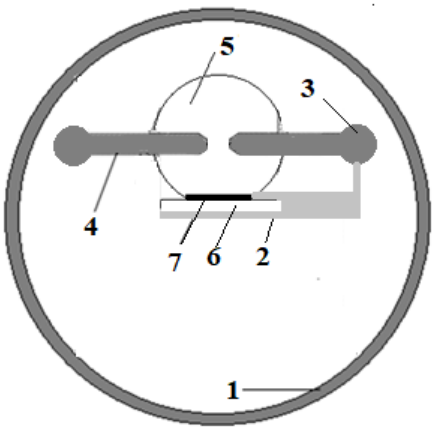



**Fig. 1. The scheme of a pulsed plasma-chemical reactor: 1 — dielectric discharge chamber casing, 2 — substrate fixation system for thin film spraying, 3 — interelectrode distance control system, 4 — metal electrodes, 5 — film deposition zone, 6 — glass substrate, 7 — film**

To ignite the discharge, high-voltage bipolar pulses with a total duration of 50–100 ns and an amplitude of ± (20–40) kV were applied to the metal electrodes. At the same time, between the tips of the electrodes, a uniform discharge was ignited with an amplitude of current pulses of 50-170 A [8, 9]. The plasma volume did not exceed 5-10 $mm^3$. The voltage pulses at the discharge gap and the discharge current were measured using the wideband capacitive divider, the Rogowski belt, and the 6-LOR 04 wideband oscilloscope. The time resolution of this recording system was 2-3 ns.

The investigation of spatial characteristics of the discharge was carried out using a digital camera. The pulse repetition rate was varied in the range of f=35-1000 Hz. To record the plasma emission spectra, the MDR-2 monochromator, the FEU-106 photomultiplier, the DC amplifier, and the electronic potentiometer were used. The radiation of discharge plasma was analysed in the spectral range of 200–650 nm.

The transmission spectra of radiation by thin nanostructured films, which were deposited on glass substrates, were recorded using an OCEAN OPTICS USB 2000 spectrometer. The films were deposited for 30–60 minutes with a glass substrate installed at a distance of 30 mm from the center of the discharge gap at an interelectrode distance of 1-3 mm. The image of the surface of thin nanostructured films was recorded using a Cross Beam Workstation Auriga (Carl Zeis) scanning electron microscope. The Raman scattering spectra were excited using an argon ion laser, which generated radiation at a wavelength of 514.5 nm. The Raman spectra of radiation scattering on copper and zinc oxide thin films were studied using an nVia Renishaw spectrometer.

**Characteristics and Parameters of Overvoltage Nanosecond Discharge.** Let us consider the results of the study of the characteristics and parameters of the plasma of an overvoltage nanosecond discharge in the air between zinc and copper electrodes under the condition of microtip explosions on the surface of the electrodes and the formation of the corresponding ectons. Photos of the discharges at the voltage pulse repetition rate (f = 40-1000 Hz) for all types of electrodes (Zn, Cu) or their combinations, when the distance between them was within 1-3 mm were the same as for the discharge between copper electrodes [4, 10]. At the repetition frequency of the discharge pulse in the range of 35-150 Hz, a diffuse appearance occurred. The diameter of the plasma in the interelectrode gap was approximately equal to the interelectrode distance. In the range of intervals 400–1000 Hz, the diameter of the plasma of an overstressed nanosecond discharge increases by a factor of 3–4. Under the condition of ignition of a fairly homogeneous diffuse discharge under the conditions of these experiments, they were considered in [4].

Figure 2 shows oscillograms of voltage and current pulses for a discharge between copper electrodes.

Similar waveforms were also obtained for discharges between zinc electrodes. The duration of the main part of the voltage pulse train reached 50-120 ns. Bipolar voltage impulse peaks had an amplitude of a positive and negative component up to 20-30 kV. The discharge current pulses were a sequence of current pulses with an amplitude of positive and negative pulses of 120-150 A.

The total length of a sequence of current pulses with an amplitude falling in time, reached 150–200 ns. By graphically multiplying the oscillograms of the current pulses and the oscillograms of the voltage, the time distribution of the pulse contribution of energy to the plasma of the discharge under study was obtained. The maximum pulse power of the discharge was observed in the initial stage of the breakdown of the discharge gap and reached 2-4 MW.

Integration over time of the pulse power made it possible to determine the electrical energy that was introduced into the plasma of a nanosecond discharge during one sequence of voltage and current pulses. For the conditions of our experiments, the energy that was deposited in the plasma in one pulse reached E = 100 mJ. The spectra of ultraviolet radiation of the plasma of the investigated discharge between copper electrodes and the results of their identification are given in [4], and the emission spectra of the discharges between the electrodes of zinc and stainless steel are shown in Fig.3. Approximately 90% of the plasma radiation power in the spectral range of 200–1000 nm for discharges between zinc and copper electrodes is concentrated in the spectral range of 200–260 nm. For the overvoltage nanosecond discharge between copper electrodes, the spectral lines of copper ions in the emission spectrum were the main ones; in the UV spectra of the discharge between zinc electrodes, the spectral lines of zinc atoms and ions were: 202.6; 206.2 nm Zn II; 250.2; 255.8 nm Zn I. The nanosecond discharge plasma parameters for a mixture of copper and air vapor at atmospheric pressure (component ratio 30: 101 kPa, respectively) were determined numerically and calculated as full integrals of the electron energy distribution function (EEDF). The EEDFs were found numerically by solving the kinetic Boltzmann equation in the two-term approximation. Calculations of the EEDF were performed using the program [11]. On the basis of the EEDF, the average electron energy and electron mobility were determined. The ratio of copper vapor concentrations and gas concentrations of the standard atmosphere at a pressure of 1001 kPa: argon, carbon dioxide, oxygen, and nitrogen was as follows: 0.3: 7: 0.27: 159: 599. The calculations were carried out in dependence of the plasma parameters on the ratio of the electric field intensity (E) to the total concentration of copper, argon atoms and carbon dioxide, oxygen and nitrogen molecules, (N). The range of variation of the parameter E / N = 1-1300 Td ($1 \cdot 10^{-17}$ - $1 \cdot 10^{-15}$ V cm$^2$). The integral of electron collisions with atoms and molecules takes into account the following processes: elastic electron scattering on copper atoms, excitation of energy levels of copper atoms (threshold energy 1.500 eV, 3.800 eV, 5.100 eV), ionization of copper atoms (threshold energy 7.724 eV); elastic scattering of electrons on copper atoms, excitation of the energy level of argon atoms (threshold energy 11.50 eV), ionization of argon atoms (threshold energy, 15.80 eV); elastic scattering and excitation of energy levels of carbon dioxide molecules: vibrational (energy threshold: 0.083 eV, 0.167 eV, 0.252 eV, 0.291 eV, 0.339 eV, 0.422 eV, 0.505 eV, 2.5 eV), electronic (energy threshold: 7.0 eV, 10.5 eV), dissociative electron attachment (threshold energy 3.85 eB), ionization (threshold energy 13.30 eV); elastic scattering and excitation of energy levels of oxygen molecules: vibrational (energy threshold: 0.190 eV, 0.380 eV, 0.570 eV, 0.750 eV), electronic (energy threshold: 0. 977 eV, 1.627 eV, 4.500 eV, 6.000 eV, 8.400 eV, 9.970 eV, dissociative electron sticking (threshold energy - 4.40 eV) ionization (threshold energy - 12.06 eV); elastic scattering and excitation of energy levels of nitrogen molecules: rotational – threshold energy 0.020 eV, vibrational (threshold energy: 0.290 eV, 0.291 eV, 0.590 eV, 0.880 1.170, 1.470, 1.760, 2.060, 2.350; electronic: 6.170 eV, 7.000, 7.350, 7.360, 7.800, 8.160, 8.400, 8.550, 8.890, 11.03, 11.87, 12.25, 13 .00, ionization (threshold energy - 15.60 eV).

The data on the absolute values of the effective cross sections for these processes, as well as their dependences on the electron energy, are taken from the database [18]. The concentration of electrons (Ne) was calculated by the known formula [19]: $N_e = j/e \cdot V_{dr.}$, where j – density of the current in the discharge, e – electron charge, $V_{dr.}$ – electron drift velocity. The electron drift velocity was determined from the expression: $V_{dr} = \mu_e \cdot E$, where μe is the electron mobility, E is the field strength on the plasma. The field tension on the plasma E was calculated by the formula: $E = U_{pl.}/d$, $U_{pl}$ – voltage on the plasma, d - value of the discharge gap. The average energy of the discharge electrons most strongly depends on the parameter E/N = 1-400 Td, while it linearly increases from 0.15 to 8.77 eV. For the range of the reduced electric field strength of 615 Td - 820 Td, at which experimental studies of the electrical T and the optical characteristics of the discharge were carried out, the average electron energies varied within 12.6 - 16.5 eV.

The results of calculating the average electron energies make it possible to determine their temperature in the gas-discharge radiator plasma from the well-known formula [19]: $\varepsilon = 3/2 \cdot kT$, where ε is the electron energy, k – the Boltzmann constant, T – temperature in Kelvin. It increases from 146160 K to 191400 K when the parameter E/N changes from 615 to 820 Td, respectively.

The electron mobility, as follows from the numerical calculation data, varies within $1.1130 \cdot 10^{24} \cdot N$ - $1.031 \cdot 10^{24} \cdot N$ (1/m/V/s) when the E/N parameter is changed in the range of 615 Td - 820 Td, which gives the values of electron drift velocities of $6.8 \cdot 10^4$ m/s and $8.4 \cdot 10^4$ m/s, respectively, for a plasma field tension of $15.0 \cdot 10^6$ V/m and $20.0 \cdot 10^6$ V/m, the value of electron concentration $70.3 \cdot 10^{21}$m$^{-3}$ - $56.9 \cdot 10^{21}$ m$^{-3}$ at a current density of $765 \cdot 10^6$ A/m$^2$ on the surface of the electrode of the radiation source ($0.196 \cdot 10^{-6}$ m$^2$).

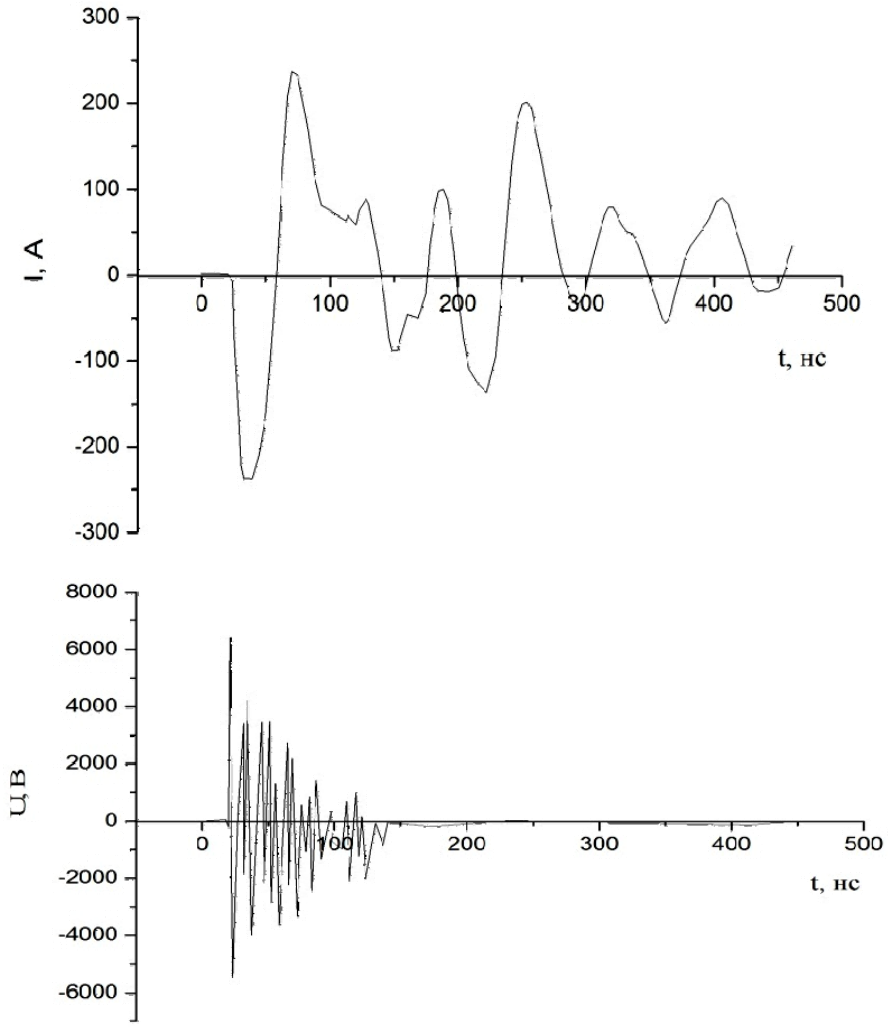



**Fig. 2. Oscillograms of current and voltage of an overstressed nanosecond discharge in air between a copper electrode and a stainless steel electrode (interelectrode distance d = 3 mm)**

Under the conditions of this experiment, the main mechanism for the entry of zinc, copper, and iron vapor into the plasma is ectonic (an explosion of microtips on the surface of electrodes), in which the electron density of the plasma can reach $10^{16}$-$10^{17}$ $cm^{-3}$ [12]. Therefore, an important contribution to the mechanism of formation of excited atoms and transition metal ions can be made by the excitation of metal ions in the ground state by electrons, as well as electron-ion recombination processes. The effective cross sections for these processes, for example, for zinc and cadmium ions, are large enough and reach $10^{-6}$ $cm^2$ [13].

**Characteristics of thin nanostructured films based on oxides of zinc, copper and iron**

Let us consider the main results of the study of the characteristics of nanostructures based on zinc and copper oxides, which are deposited on a glass substrate near the discharge gap.

In Fig. 4 the photograph of the film surface deposited on a glass substrate from the products of erosion of copper electrodes and products of dissociation of air molecules in an overvoltage nanosecond discharge is presented. To determine the size of nanostructures, a gel was deposited on the surface of the film on the basis of standard gold nanostructures of spherical shape with a diameter of 20 nm (they are highlighted in photos in yellow). A comparative analysis of the sizes of spherical gold nanostructures and nanostructures synthesized from products of a nanosecond discharge between copper electrodes in air showed that the sizes of synthesized nanostructures are in the range of 2–20 nm. The transverse dimensions of nanostructures based on zinc oxide were in the range of 2-50 nm, but the formation of large zinc agglomerates with sizes of 1–10 μm was also observed. With increased air pressure and high energy deposition into the plasma (when nanosecond discharges in liquid or air are used to synthesize nanostructures), predominant formation of nanovisexors or nanostructures of transition metal oxides of a more complex form is observed.

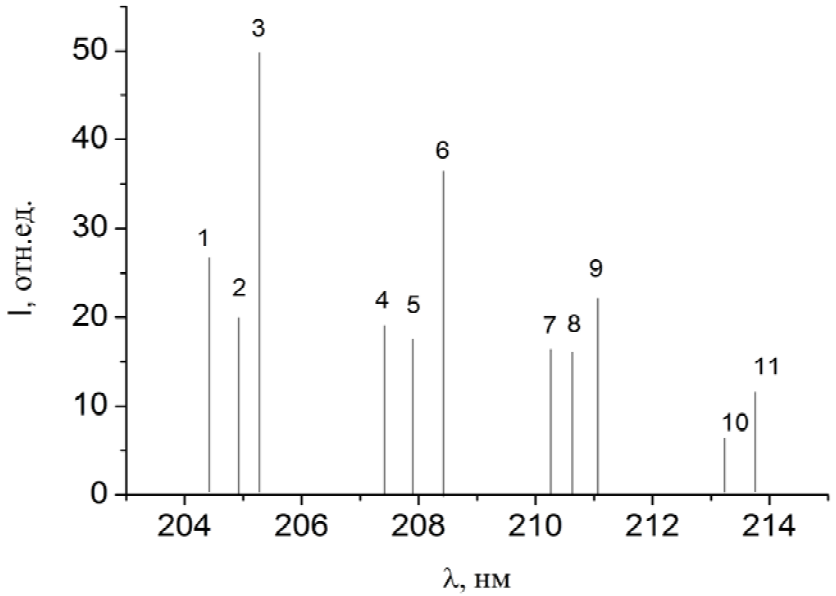



**Fig. 3. A portion of the plasma emission spectrum of a nanosecond discharge between zinc electrodes with the most intense spectral lines of atoms and zinc ions (d = 2 mm; f = 100 Hz)**

This was confirmed by studying the spectra of Raman scattering of laser radiation with a wavelength of 514.5 nm nanostructures of oxides of zinc or copper, synthesized in the investigated discharge and comparing them with the corresponding Raman spectra of nanowiskers of other researchers. For example, in [14], zinc oxide nanostubes of boules were obtained as a result of the action of a powerful gas-discharge laser on KrF molecules, which emitted at a wavelength of 248 nm, on the surface of a ceramic ZnO target. As can be seen from [5], the Raman spectrum of Ar + laser radiation recorded by us correlates well with the corresponding spectrum obtained in [14], where Raman scattering of the same laser radiation on zinc oxide nano-columns with a diameter of 8-35 nm was studied. Therefore, we can assume that, under the conditions of our discharge, the synthesis of zinc oxide nano-columns occurs perpendicular to the surface of the glass substrate.

**Fig. 4. The structure of the surface of the film synthesized on a glass substrate from the products of sputtering copper electrodes in atmospheric air for 30 minutes under the action of a high-current nanosecond discharge (d = 1 mm and f = 100 Hz)**

In Fig. 5 the transmission spectrum of copper oxide nanostructures is given. The transmission of such films increased with an increase in the wavelength in the visible region of the spectrum and the shape of the continuum without maxima and minima in the range from 500 to 650 nm. It correlates well with the spectrum of passing copper oxide ($Cu_2O$) nanostructures [15]. The absorption band of the film in the wavelength range of 550–580 nm corresponds to the absorption band of copper nanostructures [16, 17]. The narrow bands of film clarification in the blue region of the spectrum (at wavelengths of 420 and 450 nm) are probably associated with the action of ultraviolet discharge radiation in the spectral range 200-230 nm on the film during its synthesis. The same bands of enlightenment were observed for films based on zinc oxide. The cause of the appearance of such bands of enlightenment can be radiation defects of films of copper oxide zinc and the formation of new energy levels in these compounds. The most intense were the transmission bands of nanostructures based on zinc and copper oxides,

which was correlated with selective and intense plasma radiation of zinc and copper vapors in the spectral range 200-230 nm.

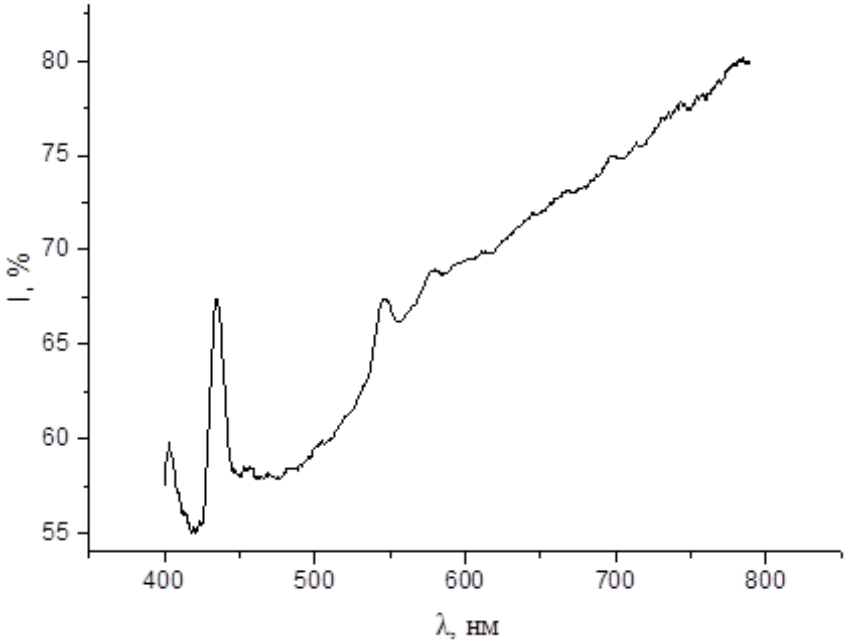



**Fig. 5. The transmission spectrum of radiation in the center of the film obtained by sputtering copper electrodes in air for 30 minutes (d = 1 mm and f = 100 Hz)**

## Conclusions

It has been established that overvoltage nanosecond discharge in atmospheric pressure air between copper or zinc electrodes is the selective source of radiation of atoms and ions of zinc and copper in the spectral range 200–230 nm; at the same time, plasma is the source of copper or zinc oxide nanostructures streams, which can be used in microbiologists, medicine and agrotechnologies, and when automatically assisted by ultraviolet radiation of plasma, thin nanostructured films based on oxides of zinc and copper characterized by transparency windows in the blue spectral range are synthesized, which can be used in optoelectronics.

## References

1. Vasilyak L.M. The use of pulsed electric discharge lamps for bactericidal treatment. Electronic processing of materials. 2009, 45 (1), 30–40.

2. Shuaibov K. K., Gritsak R.V. Ultraviolet lamps on the radicals of the solar system and axial molecules for pumping a bar with a nanosecond rocket. Monograph 2018. Uzhgorod: DVNZ "Uzhgorod National University", Vidavnitstvo "Goverla". 114 s. ISBN: 978-617-7333-63.

3. Moshkunov S.I., Khomich V.Yu., Shershunova E.A. Compact source of flare corona for biological and medical applications. Letters to ZhTF.2018, 44 (2), 104–110.

4. Shuaibov A.K., Minya A.Y., Gomoki Z.T., Danilo V.V., Pinzenik R.V. Characteristics of a high-current pulsed discharge in air with an ecton mechanism for the injection of copper vapor into the discharge stream. Electronic processing of materials. 2018, 54 (1), 46–50.

5. Shuaibov Alexander, Minya Alexander, Malinina Antonina, Malinin Alexander, Golomd Roman, Shevera Igor, Gomoki Zoltan and Danilo Vladislav. It has been shown that it has been shown that it has been shown that it has been shown that it has been shown that it is not a problem to make a difference. 2018, 9, 035018. 7 p.

6. Egorova E.M. Biological effects of metal nanoparticles. M.: Science, 2014. 350 p.

7. Zatolokin V.D., Moshkin A.S. The effect of aqueous dispersions of oxide nanostructures of metals on the course of purulent wounds. Bulletin of experimental and clinical surgery. 2010, 3 (1), 44–51.

8. Alexsander Shuaibov, Oleksandr Mynia, Mykhaylo Chuchman, Zoltan Homoki, Vladislav Danylo. Characteristics of overstrained nanosecond discharge in the air wich copper steam. Proceedings of the XIII International Conference “Electronics and Applied Physics. Kyiv. Ukraine, October 24–27, 2017 Taras Shevchenko National University, p. 151–152.

9. Shuaibov, O.K., Minya, O.Y., Chuchman, M.P., Malinina A.A., Malinin A.N., Danilo V.V., Gomoki Z.T. Parameters of Nanosecond Overvoltage Discharge Plasma in the Air Gap between the Electrode Material Vapor. Ukr. J. Phys. 2018, 63 (9), 790–801.

10. Baksht E.Kh., Tarasenko V.F., Shutko Yu.V., Erofeev M.V. A point source of UV radiation with an accuracy of 1 kHz and a short pulse duration. Proceedings of higher educational institutions. Physics. 2011, 54 (11), 91–94. http: www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/

11. Mesyats G.A. Ecton or electron avalanche from metal. Usp. Fizich. Nauk. 1995, 38, 567–590.

12. Ovcharenko E.V., Imre A.I., Gomonai A.N., Hutych Yu.I. Emission cross-sections of the In2 + ion VUV laser transitions at electron – In + ion collisions. J. Phys. B Atom. Mol. Opt. Phys. 2010, 43 (17), 230–234.

13. Kaidashev V.E., Kaidashev E.M., Peres M., Monteiro T., Correia M.R., Sobolev N.A. Optical and structural properties of ZnO nanorods obtained by the method of pulsed laser deposition without a catalyst. Zhtf 2009, 79 (11), 45–49.

14. Zamanova E.N., Aliyeva L.A. Structure and optical properties of copper oxide films p Cu2O obtained by low-temperature chemical deposition of Fizika. 2008. XIV (3), p. 194–196.

15. Farmanfarmas B., Rashidian Vaziri, MR, Hadzhismailbayzhi, F. Study of the non-local nonlinear-optical response of copper nanostructured thin films produced by pulsed laser spraying. Quantum. electron. 2014, 44 (11), 1029–1032.

16. Shuaibov A.K., Minya A.Y., Malinina A.A., Malinin A.N., Danilo V.V., Sichka V.Yu., Shevera I.V. Copper Electrodes Synthesis of Copper Oxides Nanostructures by An Overstressed Nanosecond Discharge in Atmospheric Pressure. American Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2018, 2 (1), 8–14.

Рецензія/Peer review : 9.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-216-220
УДК 543.6:543.054

Н.Ю. ГРИБОВА, О.Ю. КУРСЕНКО, О.І. ХИЖАН, Л.О. КОВШУН
Національний університет біоресурсів та природокористування України, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця

# МЕТОДОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ПРОБ В КОНТРОЛІ ВМІСТУ КСЕНОБІОТИКІВ

*В роботі опрацьовано методологію підготовки проб продукції рослинництва (насіння олійних культур, листя салату, плодів яблук) для дослідження методами хроматографічного контролю вмісту ксенобіотиків трьох хімічних груп пестицидів: похідні бензімідазолу, похідні анілінопіримідину, похідні біпіридилію. Методологія містить процеси гомогенізації проби, отримання рослинної витяжки, очистки витяжки методами твердо-фазної або рідинно-рідинної екстракції, отримання екстракту аналітів. Ґрунтуючись на хімічному складі матриці зразка та переліку аналітів запропоновано оптимальні умови варіативної складової методології, а саме: отримання рослинної витяжки під дією селективних розчинників при співвідношеннях гомогенізована сировина-розчинник від 1:5 до 1:20 в умовах постійного перемішування екстракційної системи зі швидкістю 180–200 об./хв, або при дії ультразвукових коливань частотою 37 кГц при температурі від 4°С до 25°С протягом 5–25 хвилин. Контроль якісного та кількісного складу рослинних витяжок та екстрактів аналітів досліджено методами високоефективної рідинної та газової хроматографії з мас-селективними детекторами.*

*Ключові слова: показники безпечності, ксенобіотики, пестициди, похідні бензімідазолу, похідні анілінопіримідину, похідні біпіридилію, рослинні витяжки, екстракти, хроматографія.*

N.Y. HRYBOVA, O.Y. KURSENKO, O.I. KHYZHAN, L.O. KOVSHUN
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Bogomolets National Medical University

## METHODOLOGY OF SAMPLE PREPARATION FOR XENOBIOTICS CONTENT ANALYSIS

*Different groups of pesticides are widely used in agriculture to protect oils crops,* vegetables and fruits, *there are derivatives of benzimidazole, anilinopyrimidine, bipyridylium. The methodology of pesticides control are studying. Optimal conditions of different sample preparation methods and instrumental laboratory control methods were detected. The aim of this study is to examine the different physical and chemical conditions which can be use at practical safety control on the sample preparation procedure for seeds,* lettuce leaves and apples fruits*. Sample preparation, as a part of laboratory control, have the unique meaning and special importance, contains the multistep endeavour with the expected xenobiotics. The first step on the sample preparation procedure this is sample homogenization, on the next step - xenobiotics extraction using different selective extractants. In this work homogenization of samples was carried out in a glass of a modern mill-homogenizer at a speed of 10000 rev per minute. The obtained homogenized samples due to the difference in its matrix chemical composition and nutritional value had a different aggregate state. Various variations of sample preparation methods were used: extraction by organic liquids (chloroform, acetone, n-hexane, acetonitrile, iso-propanol) and its solutions with mineral and organic acids, extraction by liquids with ultrasound. The general sample preparation scheme was determined and its contains: sample homogenization, plant extraction under the action of selective solvents at ratios 1:5 – 1:20 (raw material-solvent) with the heterogeneous system constant mixing at a speed of 180-200 rev per minute, or under ultrasonic action with a fixed frequency (37 kHz) at a temperature from 4°C to 20°C, on the period 5 - 25 minutes. Plant extracts and analytes extracts was investigated by methods of high-performance liquid chromatography and gas chromatography with both mass-selective detectors which provided the composition control of qualitative and quantitative xenobiotics content.*

*Keywords:* safety, xenobiotic, pesticides, *derivatives of benzimidazole, derivatives of anilinopyrimidine, derivatives of bipyridylium*, plant extracts, extracts, chromatography

## Вступ

Сучасна продукція рослинництва розподіляється на продукцію органічного виробництва та продукцію, отриману за класичною агротехнологією, що передбачає використання агрохімікатів. Наприклад, в процесі вирощування насіння олійних культур, листкових та стеблових овочів, плодів зерняткових культур зазвичай використовують засоби захисту рослин, активними компонентами яких є пестициди різних груп [1]. Залишкові кількості пестицидів є ксенобіотикати і разом з іншими техногенними забруднювачами нормуються згідно санітарно-гігієнічних правил та норм, їх вміст контролюється відповідними лабораторіями згідно стандартизованих методів [2]. Методологія вимірювання показників безпечності в продукції рослинництва сьогодні активно розвивається. Наприклад, лабораторний контроль ксенобіотиків групи поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), що накопичуються в насінні олійних культур описано та проаналізовано в роботах [3, 4] методом високоефективної рідинної хроматографії з флуоресцентним детектором після застосування стадії твердофазної екстракції аналітів. В процесі модернізації методів дослідження залишкових кількостей пестицидів можна виділити стадії підготовки проби до дослідження та інструментальні дослідження рослинної витяжки і цільових аналітів рослинного екстракту, очищеного від коекстрактивних хімічних сполук. Для виокремлення цільових аналітів можна застосовувати специфічні екстрагенти та сорбенти, дію фізико-хімічних чинників, що змінюють реологічні властивості екстракційних систем та дозволяють інтенсифікувати вихід з рослинної сировини до екстракту необхідних компонентів [5, 6]. В аналізі ксенобіотиків, що відносяться до різних груп пестицидів поширено використання методу QuEChERS (quick, easy, cheap, effective, rugged and safe – швидкий, зручний, економічний, ефективний, надійний і безпечний) [7], разом з тим цей метод лабораторного контролю не дозволяє вилучити деякі ксенобіотики, наприклад сполуки ПАВ та пестициди групи біпіридилію (дикват, хлормекват, паракват). Відомо, що спектр застосування похідних біпіридилію – це рослини соняшнику, насіннєві посіви буряку столового, капусти, моркви та редьки, рослини картоплі, конюшини, сорго,

люцерни, бобів кормових, сої. Похідні біпіридилію швидко поглинаються зеленими частинами рослин, контактна діюча речовина дикват, швидко перетворюється на перекис водню, який призводить до руйнування мембран клітини і засиханню рослин, діюча речовина швидко розкладається в рослині, тому застосування диквату вважається безпечним, як на насіннєвих посівах, так і на посівах призначених для продовольчих цілей. Дія препарату відбувається одразу після внесення, візуальний ефект десикації помітний вже за 4–7 діб. Згідно з результатами досліджень [8] похідні біпіридилію діють швидко та витрачаються в залежності від умов навколишнього середовища за 50–98 годин, тому лабораторний контроль доцільно проводити з урахуванням термінів застосування диквату та не зволікати з підготовкою проби до аналізу. Для диквату Державними санітарними правилами та нормами «ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001» встановлено максимальний вміст залишкових кількостей в насінні соняшнику на рівні 0,5 мг/кг, проте методики дослідження не встановлено. Враховуючи сучасні підходи в аналізуванні існує потреба в розробці методології аналізування залишкових кількостей пестицидів різних хімічних груп наприклад: сумішей похідних біпіридилію, похідних бензімідазолу та похідних анілінопіримідину в насінні, зелених частинах та плодах сільськогосподарських культур.

**Метою даної роботи** є встановлення оптимальних умов підготовки проб продукції рослинництва для вилучення ксенобіотиків, встановлення їх якісного та кількісного складу хроматографічними методами лабораторного контролю.

В роботі застосовано зразки продукції рослинництва: насіння олійних культур (соняшник, соя, льон), листя салату різних сортів, плоди яблук різних сортів. Сформовано декілька паралельних лабораторних проб, з яких по три проби підлягали штучному збагаченню цільовими ксенобіотиками. Гомогенізація проб проводилась шляхом подрібнення в стакані лабораторного млину-гомогенізатору ЛЗМ-1, при різних температурах (від +4°С до +25°С). Для отримання рослинної витяжки застосовувалися хімічні речовини кваліфікації «ч.д.а»: ацетонітрил, метанол, ацетон, н-гексан, толуол, ізопропанол, кислоти (оцтова, мурашина, трифтороцтова, соляна). Перелічені сполуки застосовувалися як індивідуальні екстрагенти, або в сумішах, в тому числі і в суміші з деіонізованою водою. Для буферизації розчину шару гомогенізованого зразка та на етапі очистки рослинної витяжки використовували хімічні сполуки кваліфікації «ч.д.а.»: сульфат магнію, хлорид натрію, цитрат натрію, хлорид кальцію, оксид алюмінію. Екстракція здійснювалася в пластикових пробірках з політетрафторетилену, в колбах з темного скла та пластикових колбах з поліметилпентену, захищених світлонепроникними кожухами. Інтенсифікація масопереносу при вилученні аналітів відбувалася при варіюванні співвідношення сировина-екстрагент, під дією температури, перемішування, ультразвукових хвиль частотою 37 кГц (генерувалися установкою фірми Advantage Lab). Розділення фаз екстракційної системи проведено із використанням центрифуги Thermo Scientific, за 10 хвилин при 7000 об//хв, 4°С. Отримана рослинна витяжка підлягала очищенню від коекстрактивних речовин методами дисперсійної екстракції або рідинно-рідинної екстракції з використанням органічних розчинників та картриджів заповнених сумішами первинних і вторинних амінів виробництва Supelco. Концентрування очищеного екстракту проведено в ротаційному випаровувачі фірми ІКА. Аналіз вмісту ксенобіотиків в отриманих розчинах проведено методами високоефективної рідинної та газової хроматографії із мас-спектрометричними детекторами (ВЕРХ/МС/МС та ГХ/МС) на хроматографах фірм Dionex та Agilent. Результати аналітичних сигналів, спектри аналітів опрацьовані за допомогою калібрувальних залежностей та баз даних програми Cromeleon 6.0 та інстальованої бібліотеки мас-спектрів NIST 0.5.

Підготовка лабораторної проби до дослідження розпочинається з універсального для різних груп продуктів харчування етапу гомогенізації зразка. В даній роботі гомогенізація зразків проводилася в стакані млинку-гомогенізатора при швидкості 10000 об/хв. Отримані гомогенізовані проби через відмінність хімічного складу кожної з матриці відрізнялися агрегатним станом: дрібнозернистий, пастоподібний, рідкий. Виходячи з літературних даних щодо харчової цінності і хімічного складу матриці зразків [9] за формулою (1.1) було розраховано та наведено в таблиці 1 масові частки (W,%) хімічних сполук ($m_{компоненту}$) матриці:

$$W = \frac{m_{компоненту}}{m_{гомогенізованого\ зразка}} \times 100\% \quad (1.1)$$

Таблиця 1

**Масова частка хімічних сполук у складі матриці зразків продукції рослинництва**

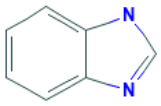
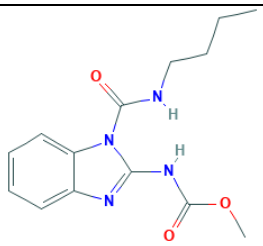
| Ядра насіння соняшнику | Листя салату «Айсберг» | Плоди яблук зі шкіркою |
|---|---|---|
| жири 51,46 %;<br>білки 20,78 %;<br>вуглеводні 10,21 %;<br>вода 4,73 %;<br>інші хімічні сполуки 12,82 % | жири 0,08 %;<br>білки 0,90 %;<br>вуглеводні 2,97 %;<br>вода 95,64 %;<br>інші хімічні сполуки 0,41 % | жири 0,17 %;<br>білки 0,26 %;<br>вуглеводні 11,41 %;<br>вода 85,56 %;<br>інші хімічні сполуки 2,60 % |

Як можна бачити з таблиці 1 гомогенізоване насіння соняшнику містить значну кількість жирів, а основним компонентом гомогенізованих зразків листя салату та плодів яблук є вода. Оскільки фізико-хімічні властивості матриці та цільових ксенобіотиків визначають екстрагенти здатні розчиняти та вилучати ксенобіотики [10–12], в роботі застосовано широковживані в лабораторній практиці полярні та неполярні,

протонні та апротонні розчинники та їх суміші. Застосовано добавки органічних та мінеральних кислот для зрушення рівноваги процесу дисоціації іоногенних ксенобіотиків у бік утворення молекул і створення оптимальних умов вилучення екстрагентом ксенобіотиків з гомогенізованої сировини. Оптимальне співвідношення екстрагент-гомогенізований зразок встановлено за результатами візуального аналізу зовнішнього вигляду екстракційних систем та перевірено за допомогою хроматографічного контролю вмісту маркерів (Беноміл, Ципродиніл, Дикват) в отриманих рослинних витяжках. Для дрібнозернистих гомогенізованих зразків насіння соняшнику оптимальним співвідношенням сировина-екстрагент є співвідношення 1:20, для пастоподібних гомогенізованих зразків плодів яблук – 1:10, для рідких зразків гомогенізованого листя салату – 1:5. За таких співвідношень та постійному перемішуванні 180-200 об/хв або при дії ультразвукових коливань частотою 37 кГц в екстракційній системі встановлено відсутність зон спресовування сировини, що є необхідною умовою здійснення масопереносу ксенобіотиків з частинок рослинного матеріалу в витяжку за рахунок конвективної дифузії [13]. Хімічна будова молекул ксенобіотиків, що належать до однієї хімічної групи, як правило, відрізняється наявністю вуглеводневих замісників (таблиця 2), що впливають на пестицидні і токсичні властивості активного інгредієнту засобів захисту рослин, змінюють фізико-хімічні властивості [1]. Виходячи з хімічної будови ксенобіотиків та аналізуючи параметр розподілу ксенобіотику в системі октаном/вода (log Pow), довідникові дані величин діелектричної проникності та дипольного моменту розчинників, було визначено і проаналізовано дію екстрагентів, здатних розчиняти і вилучати з сировини ксенобіотики, а саме: ацетонітрил, метанол, ацетон, н-гексан, толуол, ізопропанол, розчини оцтової, мурашиної, трифтороцтової та соляної кислот.

Таблиця 2

**Хімічна будова та параметри гідрофобності деяких ксенобіотиків**

| Назва хімічної сполуки | Структурна формула | log Pow |
|---|---|---|
| Бензімідазол |  | 1,3 |
| Беноміл |  | 1,4 |

Аналізуючи хімічну структуру та параметр гідрофобності ксенобіотиків, наведених в таблиці 2, було зроблене припущення, що дані ксенобіотики будуть концентруватися в органічному шарі екстракційної системи. За результатами експериментальних досліджень, що включали вилучення ксенобіотиків різними екстрагентами та кількісний аналіз ксенобіотиків в екстрактах за допомогою хроматографічних методів (рис. 1, таблиця 3), було встановлено, що для вилучення похідних бензімідазолу та похідних анілінопіримідину потрібно використовувати суміш ацетонітрилу з метанолом (у співвідношенні 4:1), похідні біпіридилію найкраще екстрагуються метанольним розчином трифтороцтової кислоти (при співвідношенні 9,5:0,5).

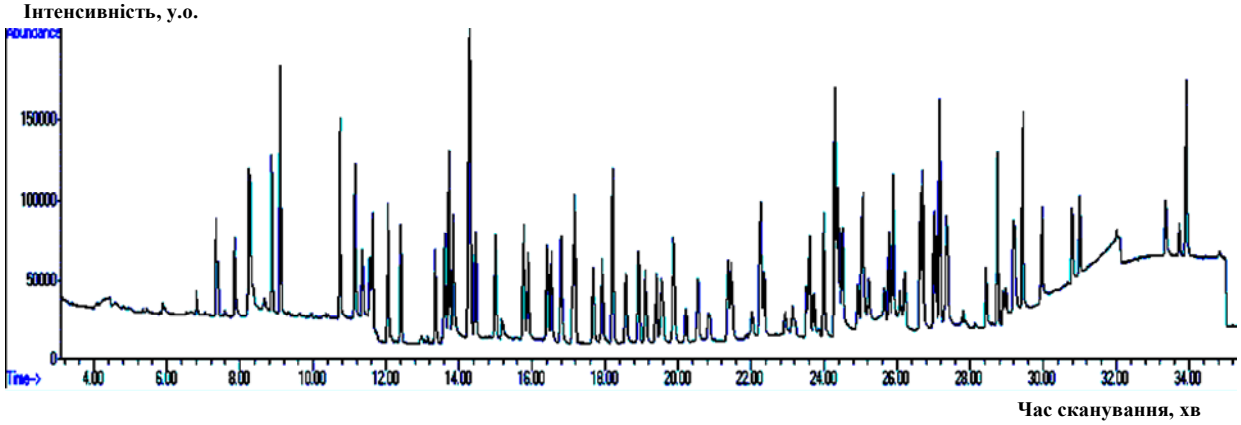



**Рис. 1. Хроматограма рослинної витяжки отриманої при дії суміші ацетонітрил: метанол (4:1) на гомогенізовані плоди яблук, штучно збагачені ксенобіотиками (Беноміл, Ципродиніл, Дикват).**
**Прилад: Agilent Technologies 7900-MSD 5975C, Колонка HP-5 MS 15m x 0.25 mm ID x 0.25um, Тиск газу-носія (Гелій) 60,7 кПа, Full Scan 45-500 а.е.м.**

Ідентифікацію піків проведено за бібліотекою мас-спектрів та шляхом порівняння двох параметрів: часу утримання піку ксенобіотику та часу утримання піку аналітичного стандарту, величини характеристичних іонів ксенобіотиків та відповідні величини аналітичних стандартів. Кількісний аналіз проведено за калібрувальними залежностями, розрахунок середнього значення та похибки величини, отриманої при вимірюванні, розраховано за допомогою програми Excel.

Таблиця 3

**Результати кількісного аналізу вмісту ксенобіотиків в екстрактах отриманих зі зразків штучно збагачених ксенобіотиками**

| Найменування маркера | Екстрагент | Внесено, мкг/кг | Визначено, мкг/кг | Вилучення, % |
|---|---|---|---|---|
| Насіння соняшнику | | | | |
| Беноміл | суміш ацетонітрилу з метанолом (4:1) | 0,50±0,01 | 0,41±0,03 | 82,0±6 |
| Ципродиніл | | 0,50±0,01 | 0,40±0,03 | 80,0±6 |
| Дикват | метанольний розчином трифтороцтової кислоти | 0,50±0,01 | 0,43±0,03 | 86,0±6 |
| Листя салату | | | | |
| Беноміл | суміш ацетонітрилу з метанолом | 0,50±0,01 | 0,49±0,01 | 98,0±2 |
| Ципродиніл | | 0,50±0,01 | 0,49±0,02 | 98,0±4 |
| Дикват | метанольний розчином трифтороцтової кислоти | 0,50±0,01 | 0,51±0,03 | 102,0±6 |
| Плоди яблук | | | | |
| Беноміл | суміш ацетонітрилу з метанолом | 0,50±0,01 | 0,48±0,01 | 96,0±2 |
| Ципродиніл | | 0,50±0,01 | 0,49±0,02 | 99,0±4 |
| Дикват | метанольний розчином трифтороцтової кислоти | 0,50±0,01 | 0,47±0,02 | 94,0±4 |

Як можна бачити з таблиці 3 найбільш повно вилучено ксенобіотики зі зразків продукції рослинництва, матриця яких містить слідові кількості жирів (таблиця 2). Найбільш складним, з точки зору проведення процесу підготовки проби до дослідження та згідно відсотку вилучення ксенобіотиків (таблиця 3), є процес отримання рослинної витяжки з насіння соняшнику. Хоча відсоток вилучених ксенобіотиків з насіння соняшнику є меншим за відсоток тих самих маркерів, вилучених з листя салату та плодів яблук, процес виконання пробопідготовки насіння соняшнику є задовільним, оскільки встановлений середній відсоток екстрагування штучно внесеного ксенобіотику, є більшим за 80% [14]. Слід зазначити, що на вміст ксенобіотиків в витяжках, отриманих зі зразків штучно збагачених аналітами (таблиця 3) впливає температура при якій виконується процес та тривалість екстракції. Найбільш оптимальними умовами є температура від 4°С до 25°С та дія екстрагенту на протязі 5–25 хвилин.

**Висновки**

Таким чином, досліджуючи кількісний і якісний вміст ксенобіотиків в рослинних витяжках та очищених від коекстрактивних речовин екстрактах встановлено оптимальні умови варіативної складової методології підготовки проб продукції рослинництва до аналізування хроматографічними методами лабораторного контролю вмісту їх ксенобіотиків. Оптимальними екстрагентами є суміші ацетонітрилу з метанолом (4:1) та суміш метанолу з трифтороцтової кислоти (9,5:0,5). Співвідношення компонентів екстракційної системи варіюється в залежності від агрегатного стану гомогенізованої проби. Встановлено, що для насіння соняшнику оптимальним співвідношенням сировини і екстрагенту є співвідношення 1:20, для плодів яблук – 1:10, для листя салату – 1:5. Екстракція проходить в умовах постійного перемішування екстракційної системи зі швидкістю 180-200 об/хв, або при дії ультразвукових коливань частотою 37 кГц при температурі від 4°С до 25°С на протязі 5–25 хвилин.

**Література**

1. Секун М.П. Пестициди. Застосування дія та післядія/ Довідник із пестицидів / М.П. Секун, В.М. Жеребкота. – К. : Колобіг, 2007. – 360 с.

2. Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській

сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті : ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2001. – 360 с. – (Державні санітарно-гігієнічні правила і норми).

3. Нестерова Л.О. Розробка методики контролю ізомерів поліциклічних ароматичних вуглеводнів в рослинних оліях / Л.О. Нестерова, Н.Ю. Грибова, О.І. Хижан // Вісник НУБіП України. – 2018. – № 286. – С. 311–319.

4. Грибова Н.Ю. Екстракція ксенобіотиків групи ПАВ з насіння соняшнику / Н.Ю. Грибова // Вісник НУБіП України. – 2018. – № 294. – С. 209–218.

5. Грибова Н.Ю. Влияние условий экстракции на антиоксидантные свойства извлеченных фитофенолов / Н.Ю. Грибова // Методы и объекты химического анализа. – 2012. – Т. 7. № 4. – С. 202–206.

6. Грибова Н.Ю. Влияние ультразвука при экстракции антиоксидантов из листьев толокнянки / Н.Ю. Грибова, Т.А. Филиппенко, А.Н. Николаевский, Е.И. Хижан, О.В. Бобылева // Химико-фармацевтический журнал. – 2008. – Т. 42, № 10. – С. 43–45.

7. Anastassiades M. Fast and easy multi residue method employing acetonitrile extraction/partitioning and "dispersive solid-phase extraction" for the determination of pesticide residues in produce / M. Anastassiades, S.J. Lehotay // J. of AOAC International. – 2003. – V. 86, № 2. – P. 412–431.

8. Review report for the active substance diquat. Finalised in the Standing Committee on Plant Health at its meeting on 12 December 2000 in view of the inclusion of diquat in Annex I of Directive 91/414/EEC

9. USDA National Nutrient Database for Standard Reference, SR-28. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service: Nutrient Data Laboratory. – 2018. – 247326 foods.

10. Barcelo D. Sample Handling and Trace Analysis of Pollutants: Techniques, Applications and Quality Assurance. / edited by D. Barcelo – Amsterdam: Elsevier Science B.V. – 2000. – 1150 p.

11. Hubert Zipper. Stability of Pesticide Stock Solutions. Experiments Conducted by EURL-SRM / Hubert Zipper // European Reference Laboratory –SRM. – 2014. – 32 p.

12. Грибова Н.Ю. Определение полициклических ароматических углеводородов в атмосферной воде методом хроматографии / Н.Ю. Грибова, Л.А. Нестерова, Е.И. Хижан, В.А. Ушкалов, В.И. Максин // Химия и технология воды. – 2018. – Т. 40, № 5. – С. 554–563.

13. MacLachlan D. Diquat / Dugald MacLachlan // Specifications for diquat have been developed by FAO. - Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. – 2008. – P. 725–803.

14. Guidance document on analytical quality control and validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed. Document No SANCO/12495/2011– [Implemented by 01/01/2014]. – European Commissionhealth & Consumer Protection Directorate-General – 2013. – 48 p. (Safety of the food chain Chemicals, contaminants, pesticides).

**References**

1. Sekun M.P. Pestytsydy. Zastosuvannia diia ta pisliadiia/ Dovidnyk iz pestytsydiv / M.P. Sekun, V.M. Zherebkota. – K. : Kolobih, 2007. – 360 s.

2. Dopustymi dozy, kontsentratsii, kilkosti ta rivni vmistu pestytsydiv u silskohospodarskii syrovyni, kharchovykh produktakh, povitri robochoi zony, atmosfernomu povitri, vodi vodoimyshch, grunti : DSanPiN 8.8.1.2.3.4-000-2001. – [Chynnyi vid 2001-01-01]. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2001. – 360 s. – (Derzhavni sanitarno-hihiienichni pravyla i normy).

3. Nesterova L.O. Rozrobka metodyky kontroliu izomeriv politsyklichnykh aromatychnykh vuhlevodniv v roslynnykh oliiakh / L.O. Nesterova, N.Iu. Hrybova, O.I. Khyzhan // Visnyk NUBiP Ukrainy. – 2018. – № 286. – S. 311–319.

4. Hrybova N.Iu. Ekstraktsiia ksenobiotykiv hrupy PAV z nasinnia soniashnyku / N.Iu. Hrybova // Visnyk NUBiP Ukrainy. – 2018. – № 294. – S. 209–218.

5. Gribova N.Yu. Vliyanie uslovij ekstrakcii na antioksidantnye svojstva izvlechennyh fitofenolov / N.Yu. Gribova // Metody i obekty himicheskogo analiza. – 2012. – T. 7. № 4. – S. 202–206.

6. Gribova N.Yu. Vliyanie ultrazvuka pri ekstrakcii antioksidantov iz listev toloknyanki / N.Yu. Gribova, T.A. Filippenko, A.N. Nikolaevskij, E.I. Hizhan, O.V. Bobyleva // Himiko-farmacevticheskij zhurnal. – 2008. – T. 42, № 10. – S. 43–45.

7. Anastassiades M. Fast and easy multi residue method employing acetonitrile extraction/partitioning and "dispersive solid-phase extraction" for the determination of pesticide residues in produce / M. Anastassiades,

8. S.J. Lehotay // J. of AOAC International. – 2003. – V. 86, № 2. – P. 412–431.

9. Review report for the active substance diquat. Finalised in the Standing Committee on Plant Health at its meeting on 12 December 2000 in view of the inclusion of diquat in Annex I of Directive 91/414/EEC

10. USDA National Nutrient Database for Standard Reference, SR-28. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service: Nutrient Data Laboratory. – 2018. – 247326 foods.

11. Barcelo D. Sample Handling and Trace Analysis of Pollutants: Techniques, Applications and Quality Assurance. / edited by D. Barcelo – Amsterdam: Elsevier Science B.V. – 2000. – 1150 p.

12. Hubert Zipper. Stability of Pesticide Stock Solutions. Experiments Conducted by EURL-SRM / Hubert Zipper // European Reference Laboratory –SRM. – 2014. – 32 r.

13. Gribova N.Yu. Opredelenie policiklicheskih aromaticheskih uglevodorodov v atmosfernoj vode metodom hromatografii / N.Yu. Gribova, L.A. Nesterova, E.I. Hizhan, V.A. Ushkalov, V.I. Maksin // Himiya i tehnologiya vody. – 2018. – T. 40, № 5. – S. 554–563.

14. MacLachlan D. Diquat / Dugald MacLachlan // Specifications for diquat have been developed by FAO. - Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. – 2008. – P. 725–803.

15. Guidance document on analytical quality control and validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed. Document No SANCO/12495/2011– [Implemented by 01/01/2014]. – European Commissionhealth & Consumer Protection Directorate-General – 2013. – 48 p. (Safety of the food chain Chemicals, contaminants, pesticides).

Рецензія/Peer review : 29.05.2019 р. Надрукована/Printed :18.07.2019 р.
Рецензент: д.х.н., проф. Максін В.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-221-226
УДК 681.51

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ, К.Д. ХОРОЛЬСЬКИЙ, О.К. КОПАЙГОРА
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МЕДИЧНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ ТЕРИТОРІЙ З ТЕХНОГЕННИМ ЗАБРУДНЕННЯМ

*В роботі розглянуто модифіковані моделі розповсюдження захворювань на територіях з техногенними забрудненнями. Виокремлено три таксони: А – з високим рівнем забруднення і захворювання людей; В – з середнім рівнем забруднення і захворювання; С – з мінімальним рівнем забруднення і захворювання. Побудовано CASE-моделі забруднення і захворювань, розроблено рекомендації родинному лікарю щодо протоколу лікування та харчування пацієнтів. Наведено інтелектуальну систему управління процесом пошуку індивідуальної траєкторії лікування та харчування за допомогою системи підтримки прийняття рішень, нейромережевих моделей стану і діагностики пацієнтів. Система дозволяє виконати пошук індивідуальної траєкторії лікування пацієнта, поведінки родинного лікаря у випадку критичних ситуацій. Головну роль в CBR-циклі процесу лікування відіграє родинний лікар, який через інтернет-зв'язок пов'язаний з n-родинами та з експертною системою хвороб пацієнта і обчислювальним центром лікарні. Система працює в режимі реального часу і дозволяє запропонувати оптимальні протоколи лікування та харчування пацієнтів.*

*Ключові слова: територія, забруднення, модель, розповсюдження захворювань, лікування, інтелектуальна траєкторія.*

V.P. KHOROLSKYI, YU.M. KORENETS, K.D. KHOROLSKYI, O.K. KOPAYHORA
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih

## INTELLIGENT SYSTEM OF MEDICAL SERVICES MANAGEMENT OF AREAS WITH TECHNOGENIC POLLUTION

*Modified models of spreading of disease in areas with technogenic pollution are considered in the work. There are three taxons isolated: A - with high level of pollution and people's diseases; B - with an average level of pollution and disease; B - the minimum level of pollution and disease. CASE-model of pollution and diseases has been developed. Recommendations to family physician concerning protocol of treatment and nutrition of patients are developed. The intellectual system for managing the process of finding an individual trajectory for treatment and nutrition with the help of decision support system, non-crammed state models and diagnostics of patients is presented. The system allows to search the individual trajectory of patient's treatment and the behaviour of a family doctor in case of critical situations. The family doctor, who is connected via internet with n-families and with the expert system of patient illnesses and the hospital's computer center, plays the main role in the CBR-cycle of the treatment process. The system works in real time and allows to offer optimal protocols of treatment and nutrition of patients.*

*Keywords: territory, pollution, model, spreading of disease, treatment, intellectual trajectory.*

### Постановка задачі

В останні роки важливого значення набувають питання діагностики екологічного стану територій з техногенним забрудненням і ефективного медичного обслуговування населення, що мешкають на таких територіях. Україна входить до 30 країн світу, які визначають 90 % захворювань. Особливо велика кількість захворювань людей виникає на територіях з величезним скупченням підприємств гірничо-металургійного комплексу, хімії, виробників чавуну та сталі, цементу тощо. До регіону з техногенними територіями відносяться Придніпровський регіон і його Криворізький мегаполіс з потужним гірничо-металургійним кластером, на території якого мешкає більше 650 тис. людей. Актуальним питанням є розробка автоматизованих систем контролю забруднення території, оцінка якості життя населення, що працює і мешкає на цій території та впровадження інтернет-систем медичного обслуговування.

### Аналіз досліджень та публікацій

Вітчизняній науці відомі інформаційно-технічні системи оцінки забруднення природного середовища, а також наукові праці з прогнозування обсягів економічного відшкодування наслідків техногенного забруднення, його впливу на якість життя населення, яке мешкає на цих територіях [1, 2]. Вплив техногенного забруднення на здоров'я людей досліджували В.П. Казначеєв, І.М. Комарницький, А.Є. Лисий, В.М. Пономаренко, С.А. Риженко та багато інших вчених [3, 4]. Математичні моделі причино-наслідкових зв'язків забруднення з кількісними параметрами захворювань досліджували Ріхард К. Дорф і Роберт Х. Бішоп [5]. Високо оцінюючи наукові досягнення щодо розв'язання наведених проблем, треба відзначити відсутність сучасних автоматизованих систем управління інтернет-медичним обслуговуванням людей, які мешкають на територіях з техногенним тиском і індивідуальною стратегією лікування.

**Метою роботи** є ідентифікація території з техногенним забрудненням та розробка з використанням нейронних мереж інтелектуальної моделі формування індивідуальної траєкторії лікування.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Для розв'язання основної задачі визначення та ідентифікації ступеня забруднення території її техногенності, розпізнавання впливу аномальних явищ на здоров'я, використаємо нейронну мережу Кохонена [6]. В якості основного класифікаційного чинника техногенності території будемо вважати здоров'я людей, частоту їх захворюваності. Будемо вважати, що населення, яке мешкає на території з техногенним тиском, можна розділити на таксони виду:

зона А з високим рівнем забруднення і високим рівнем захворювання;

зона В з середнім рівнем забруднення і низьким рівнем захворювання;

зона С віддалена від аномальних явищ території з мінімальним рівнем захворювання.

З метою ідентифікації ситуацій і побудови математичних моделей техногенних територій будемо використовувати:

нечіткі моделі, з нейронмережевим оцінюванням ситуацій (класифікація ситуацій) [6, 7];

оцінку розташування зон забруднення і захворювань за допомогою системи диференціальних рівнянь, розроблених відомими американськими вченими Р. Дорф та Р. Бішоп [5].

Населення, яке проживає на території з техногенними явищами, поділимо на три групи $\{x_1\}$, $\{x_2\}$, $\{x_3\}$.

Зона А, до якої віднесемо групу людей $\{x_1\}$, яка працює і проживає на території з найбільшим рівнем забруднення. Населення цієї зони найбільш схильне до захворювань.

Зона В, до якої відносимо групу людей $\{x_2\}$, яка проживає і працює на ділянках техногенної території, віддалених від аномальних явищ і промислових зон шахт, кар'єрів, збагачувальних фабрик, аглофабрик, виробництв металургійного заводу «АрселорМіттал Кривий Ріг» не менше 1000 м від аномальних явищ.

Зона С, до якої відносимо групу людей $\{x_3\}$, яка проживає на ділянках з найкращою, тобто квазічистою територією. Ця група людей не працює в зонах техногенного забруднення, а отже ймовірність захворювання близька до 0.

Систему диференціальних рівнянь, яка описує захворювання людей груп $\{x_1\}$, $\{x_2\}$,$\{x_3\}$, представимо у вигляді системи рівнянь виду:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\alpha x_1 - \beta x_2 + u_1(t) \\ \frac{dx_2}{dt} &= \beta x_1 - \gamma x_2 + u_2(t) \\ \frac{dx_3}{dt} &= \alpha x_1 + \gamma x_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Швидкість, з якою з'являються нові люди з схильністю до переходу на роботу в техногенні зони з високим рівнем забруднення і високою ймовірністю захворювання $u_1(t)$. Швидкість, з якою з'являються нові захворювання в дещо віддалених зонах, буде дорівнювати $u_2(t)$. Для умов чисто-екологічної зони $u_1(t) = u_2(t) = 0$. В нашій системі ми маємо фізичні зміни стану $\{x_1\}$, $\{x_2\}$,$\{x_3\}$. На рис. 1 наведено сигнальний граф, який віддзеркалює систему диференціальних рівнянь. Рівняння стану у векторно-математичній формі має вигляд:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} -\alpha & -\beta & 0 \\ \beta & -\gamma & 0 \\ \alpha & \gamma & 0 \end{Bmatrix}\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Аналіз рівняння (1) показує, що сигнальний граф, який віддзеркалює ситуацію, коли зміна стану $x_3$ залежить від $x_1$ та $x_2$, але не впливає суттєво. Розглянемо групу людей, що проживає на екологічно чистій території, для якої

$$u_1(t) = u_2(t) = 0. \quad (3)$$

Положення рівноваги системи в просторі станів відповідає $\frac{dx}{dt} = 0$.

Аналіз рівняння (2) показує, що система буде знаходитись в рівновазі, коли $x_1 = x_2 = 0$. Щоб визначити, чи буде зменшуватись захворюваність (або чи зупиняться захворювання) в зонах групи людей $\{x_1\}$, $\{x_2\}$, необхідно одержати характеристичне рівняння системи.

Сигнальний граф на рис. 1 має три контури, два з яких не дотикаються один до одного, тому визначник графа:

$$\Delta(s) = 1 - (-\alpha s^{-1} - \gamma s^{-1} - \beta^2 s^{-2}) + \alpha\gamma s^{-2} \quad (4)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$q(s) = s^2\Delta(s) = s^2 + (\alpha + \gamma)s + (\alpha\gamma + \beta^2) = 0 \quad (5)$$

Оскільки $(\alpha + \gamma) > 0$ і $(\alpha\gamma + \beta^2) > 0$, то корені цього характеристичного рівняння лежать в лівій $s$ площині, а отже, вільний рух системи при $t \to \infty$ наближається до 0.

Оцінимо динаміку можливих захворювань в зонах А, В, С.

Якщо вважати в рівнянні (5) $\alpha = \beta = \gamma = 1$, то тоді запишемо:

$$\dot{x} = \begin{Bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{Bmatrix}x + \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}u \quad (6)$$

Характеристичне рівняння системи (6) має вигляд $s^2 + 2s + 2 = 0$, а, відповідно, його корені – комплексні.

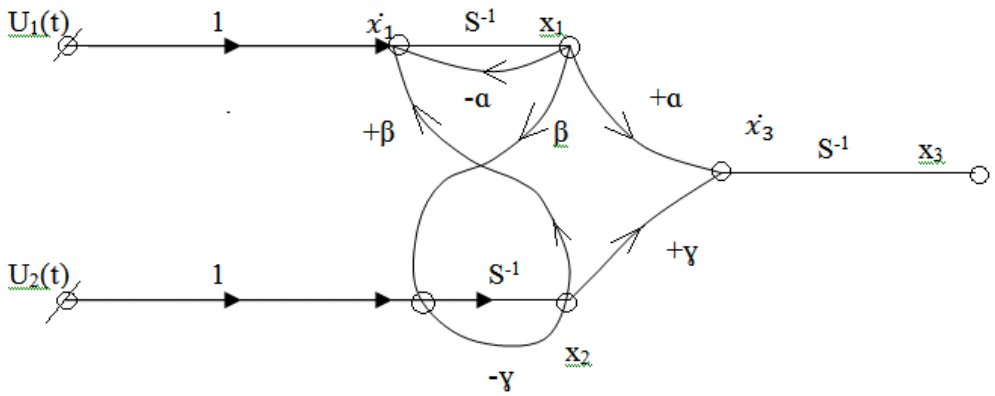



**Рис. 1. Сигнальний граф, який віддзеркалює розповсюдження захворювань на техногенній території**

Визначимо динаміку захворювань, вважаючи, що швидкість появи нових схильних до нього груп людей дорівнює 0, тобто $u_1 = 0$ .

Швидкість появи нових захворювань будемо визначати як $u_2(0) = 1$ та $u_2(K) = 0$ при $K \geq 1$. Це означає, що в початковий момент часу з'явиться лише один хворий (що еквівалентно імпульсному вхідному впливу). Постійна часу, яка відповідає комплексним кореням $\frac{1}{\delta\omega_n} = 1c$, тому вибираємо $T = 0{,}2$с. (Відмітимо, що в дійсності час може вимірюватися місцями, а вхідний вплив – тисяча людей).

Напишемо рівняння в дискретній формі:

$$x(K+1) = \begin{bmatrix} 0{,}8 & -0{,}2 & 0 \\ 0{,}2 & 0{,}8 & 0 \\ 0{,}2 & 0{,}2 & 1 \end{bmatrix} x(K) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}2 \\ 0 \end{bmatrix} u_2(K) \tag{7}$$

Реакція системи в перший момент часу $t = T$, тобто при $K = 0$ й за умови, що $x_1(0) = x_2(0) = x_3 = 0$ дорівнює

$$x(1) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0{,}2 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Після цього вхід $u_2(K)$ при $K \geq 1$ стає рівним нулю, і в момент $t = 2T$ реакція системи:

$$x(2) = \begin{bmatrix} 0{,}8 & -0{,}2 & 0 \\ 0{,}2 & 0{,}8 & 0 \\ 0{,}2 & 0{,}2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}04 \\ 0{,}18 \\ 0{,}04 \end{bmatrix} \tag{9}$$

Аналогічно в момент $t = 3T$ одержимо:

$$x(3) = \begin{bmatrix} 0{,}8 & -0{,}2 & 0 \\ 0{,}2 & 0{,}8 & 0 \\ 0{,}2 & 0{,}2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0{,}04 \\ 0{,}16 \\ 0{,}04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}064 \\ 0{,}120 \\ 0{,}064 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Розглянемо нелінійну модель захворювань людей, що проживають на територіях з техногенним забрудненням:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\alpha x_1 - \beta x_1 x_2 + u_1(t) \\ \dot{x}_2 &= \beta x_1 x_2 - \gamma x_2 + u_2(t) \\ x_3 &= \alpha x_1 + \gamma x_2 \end{aligned} \tag{11}$$

В цій моделі взаємодію між групами людей, що проживають на території, представлено нелінійним членом $x_1 x_2$, як і раніше будемо вважати, що $\alpha = \beta = \gamma = 1$

$u_1(t) = 0, u_2(0), u_2(K) = 0$ при $K \geq 1$

Виберемо крок дискретності $T$=0,2с і задаємо початкові умови у вигляді:

$x^T(0) = [100]$

Тоді, підставляючи в рівняння (11) значення $t = KT$

$$\dot{x}_i(K) = \frac{x_i(K+1) - x_i(t)}{T} \tag{12}$$

одержимо:

$$\frac{x_1(K+1) - x_1(K)}{T} = -x_1(K) - x_1(K)x_2(K), \frac{x_2(K+1) - x_2(K)}{T} = x_1(K)x_2(K) - x_2(K) + u_2(K), \frac{x_3(K+1)}{T} = x_1(K) + x_2(K)$$

(13)

Вираз із цих рівнянь $x_1(K+1)$ і, враховуючи, що $T$=0,2с, одержимо:

$$x_1(K+1) = 0{,}8x_1(K) - 0{,}2x_1(K)x_2(K)$$

$$x_2(K+1) = 0{,}8x_2(K) + 0{,}2x_1(K)x_2(K) + 0{,}2U_2(K) \quad (14)$$
$$x_3(K+1) = x_1(K) + 0{,}2x_1(K) + 0{,}2x_2(K)$$

Тоді в перший момент часу при $t = T$ маємо наступне:

$$x_1(1) = 0{,}8x_1(0) = 0{,}8$$
$$x_2(1) = 0{,}2u_2(0) = 0{,}2 \quad (15)$$
$$x_3(1) = 0{,}2x_1(0) = 0{,}2$$

Ще раз використаємо (15) і враховуючи, що $u_2(1) = 0$ одержимо наступні рівняння:

$$x_1(2) = 0{,}8x_1(1) - 0{,}2x_1(1)x_2(1) = 0{,}608$$
$$x_2(2) = 0{,}8x_2(1) + 0{,}2x_1(1)x_2(1) = 0{,}192$$
$$x_3(2) = x_3(1) + 0{,}2x_1(1) + 0{,}2x_2(1) = 0{,}40$$

Аналогічно, при $t = 3T$ маємо:

$$x_1(3) = 0{,}463$$
$$x_2(3) = 0{,}177$$
$$x_3(3) = 0{,}56$$

Подальші розрахунки не викликають проблем.

Відмітимо, що нелінійна модель більш точніше віддзеркалює проблему захворювань на території з техногенним забрудненням.

Розрахунок часових характеристик лінійних систем легко виконати наступним шляхом:

використання перехідної матриці стану;

за допомогою дискретної моделі апроксимації рівняння стану системи.

Для нелінійних систем найбільш простим методом є метод дискретизації рівняння стану. Метод дуже простий при чисельних розрахунках на комп'ютерах і дозволяє побудувати цифрову CBR-систему контроля захворювань населення, яке мешкає на території з техногенним тиском.

Робота реалізованого прототипу CBR-циклу системи розглянута детально в [7] і дозволяє на основі бібліотеки прецедентів (БП), повторного здобуття прецедентів з метою рішення поточної проблеми – оцінки стану пацієнта, який проживає на забрудненій території, та виконати навчання системи НМ-стану пацієнта, створення інтелектуальної моделі формування індивідуальної траєкторії лікування. У загальному вигляді модель уявлення прецедента включає опис ситуації забруднення території, стану хворого і рішення для даної ситуації рівняння виду:

$$CASE = (sityation, solution),$$

де $sityation$ – ситуація, яка описує прецедент хвороби; $solution$ – рішення (наприклад, діагноз хвороби, протокол лікування, тип лікувального харчування тощо). У нашому випадку (достатньо простого параметричного уявлення про стан хворого), модель запишемо у вигляді набору параметрів з конкретними значеннями і рішеннями:

$$CASE = (x_1, x_2, \ldots, x_n, R_m),$$
$$CASE = (y_1, y_2, \ldots, y_n, R_n), \quad (16)$$

де $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – це параметри ситуації, які описують ступінь забруднення і стану хворого, тобто параметри, які визначають зв'язок між таксонами A, B, C і захворюваннями; $R_m$ – рішення (діагноз та рекомендації ОПР – родинному лікарю (РЛ)). При цьому $x_1 \in X_1$, $x_2 \in X_2$, $x_n \in X_n$, де $X_1, X_2, X_n$ – область допустимих значень відповідних параметрів; $y_1, y_2, \ldots, y_n$ – параметри ситуації, які описують ступінь безпечного харчування людей, що мешкають на території з техногенним забрудненням; $R_n$ – рекомендації щодо харчування пацієнтів [8, 9]. Задачу експертного діагностування зведемо до задачі класифікації і розпізнавання ситуації забруднення, хвороби і рішення. На вхід прототипу CBR-системи подається ситуація, а на моніторі ПК родинного лікаря буде представлено прецедент, який відповідає оптимальній траєкторії лікування або інші рекомендації виду: перевести пацієнта в палату реабілітації тощо. На рис. 2 наведено інтелектуальну систему управління процесом пошуку індивідуальної траєкторії лікування пацієнтів.

В системі використані сучасні інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень ІСППР, методи суджень на основі терморальних прецедентів, які реалізовані з використанням немережевих моделей (блок НМ-модель стану пацієнта і блок діагностика пацієнта). Прецедентний підхід дозволяє спростити процес прийняття рішень в умовах обмежень часу щодо прийняття рішень і визначення протоколу лікування, а також в умовах невизначеності щодо вихідних даних пацієнта і експертних значень, які накопичені в експертній системі хвороб пацієнта (ЕСХП). Система дозволяє виконати пошук індивідуальної траєкторії лікування пацієнта, поведінки родинного лікаря у випадку аномальних (критичних) ситуацій. Головну роль в CBR-циклі процесу лікування відіграє ОПР – родинний лікар, який через інтернет зв'язаний з родинами $IP_1$, $IP_2$,…, $IP_n$, а також через систему персональних комп'ютерів ПК з ЕСХП і обчислювальним центром лікарні (ОЦЛ), розробляє протокол лікування пацієнта. У цьому випадку, ОПР довіряє лише достовірній інформації або інформації, яку РЛ одержує від блоку ЕСХП, яка надходить на персональний комп'ютер ПКЛ-лікаря.

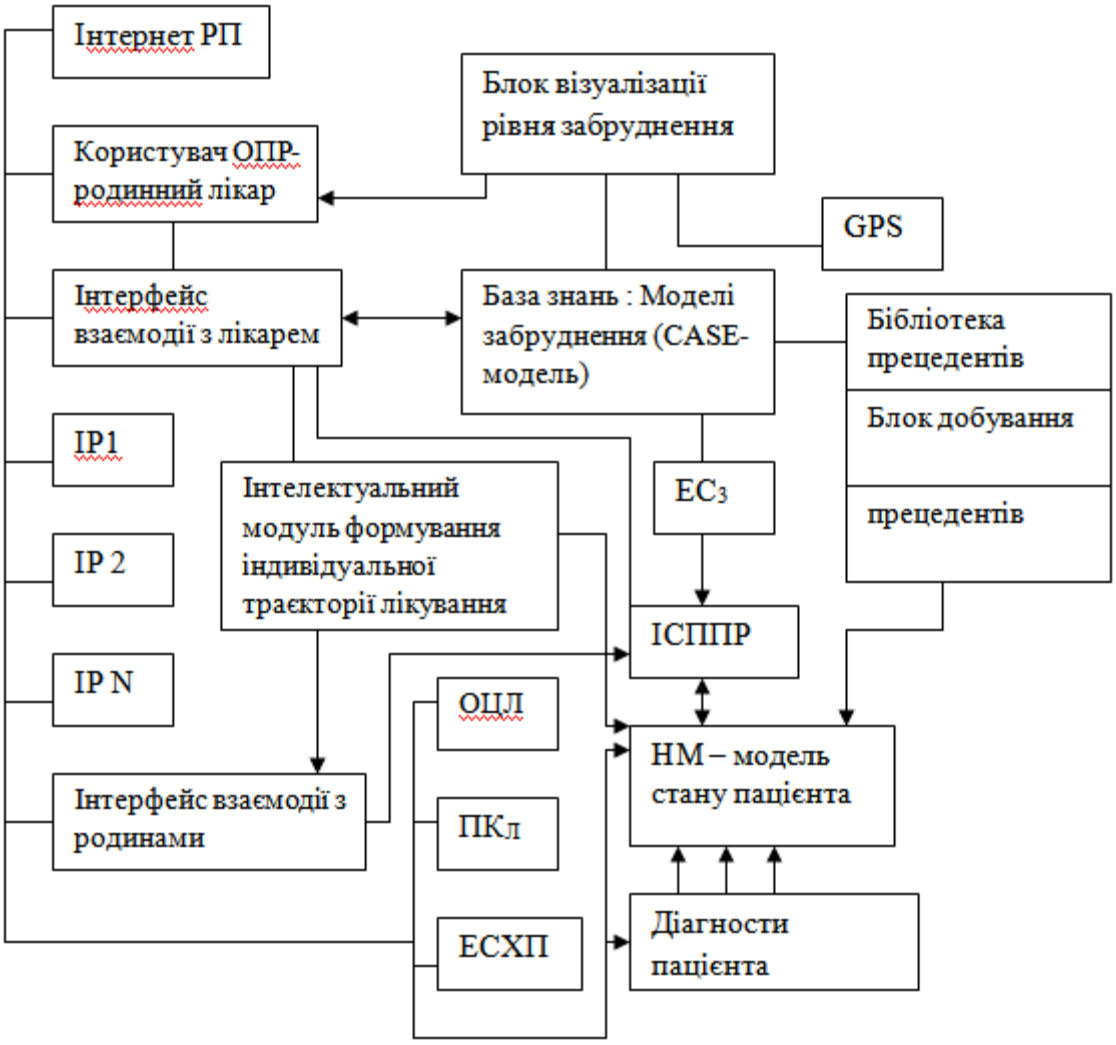



**Рис. 2. Інтелектуальна система управління процесом пошуку індивідуальної траєкторії лікування**

Головна вимога до систем ІСППР – забезпечення режиму реального часу за рахунок інтерфейсів, блока візуалізації і рівня забруднення території, системи GPS та бази знань. Іншим важливим елементом є блок НМ-модель стану пацієнта, побудована за принципом організації і функціонування біологічних нейронних мереж [7]. CBR-модуль ІСППР використовується також для оцінки критичного стану пацієнта, а за допомогою експертної системи $ЕС_3$ виконано оцінку ступеня забруднення території.

Таким чином, розв'язок задачі виконано на прикладі експертного діагностування родинним лікарем, РЛ через інтернет-технології сезонних захворювань людей на територіях, які описують таксони виду A, B, C та процес виконання протоколу лікування й надання через родинний інтернет $IP_1$, $IP_2$,…, $IP_n$ за допомогою ІСППР наступних рекомендацій:

- відправити пацієнта на лікування;
- продовжити пошук оптимального протоколу лікування, шляхом одержання додаткової інформації про стан пацієнту;
- використати протокол лікувального харчування;
- формування індивідуальної траєкторії лікування;
- невідомі проблеми захворювання (звернення до спеціалізованих лікарень);
- виписати пацієнта.

**Висновки**

Використання в складі CBR-технологій сучасних ІСППР методів пошуку рішень на основі прецедентів дозволяє побудувати інтелектуальні системи управління медичним обслуговуванням території з техногенним забрудненням.

Такий концептуальний підхід до побудови системи мінімізації захворювань населення, що мешкає на території з високим рівнем забруднення, дає можливість створити в регіоні та криворізькому мегаполісі сучасну систему охорони здоров'я, а саме мережі лікарень, родильних домів, клінік, амбулаторій тощо. Ці заходи повинні бути направлені на різке падіння смертності, у тому числі немовлят, збільшення в рази народжуваності (по відношенню до 2014 р.), стабілізацію цін на медпрепарати, ліки й медобслуговування.

**Література**

1. Управління інноваційним розвитком підприємств регіону з техногенними територіями / В.П. Хорольський, О.В. Хорольська, К.Д. Хорольський, К.Г. Рябикіна, Н.І. Рябикіна, І.П. Діянов, А.В. Романів, Д.Д. Гайдай / за ред. проф. В.П. Хорольського. – Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д.О. – 2018. – 496 с.

2. Антонюк О.П. Прогнозування обсягів економічного відшкодування наслідків техногенного забруднення криворізького регіону : монографія / О.П. Антонюк, І.М. Пістунов. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2013. – 18 с.

3. Экологические и социально-гигиенические проблемы и пути оздоровления крупного промышленного региона : моногр. / [А.Е. Лысый, С.А. Рыженко, И.П. Казярин и др.] – Кривой Рог : ООО «Этюд-Сервис», 2007. – 428 с.

4. Пономаренко В.М. Проблеми удосконалення системи управління в галузі охорони здоров'я і шляхи їх вирішення / В.М. Пономаренко, О.М. Ціборовський // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я. – 2003. – № 2. – С. 5–8.

5. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп ; пер.с англ. Б.И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.

6. Aamodt A. Cose-Based Reasonig: Foundational Issues, Methodological Variations and System Approaches / A. Aamodt, E. Plaza // Artifical Intelli Genes Communications IOS Press. – 1994. – Vol. 7. № 1. – P. 39–59.

7. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Уоссермен Ф. – М. : Мир, 1992.

8. Valentyn Khorolskyi, Aleksandr Bavyko, Svitlana Yermak, Yekateryna Riabykina, Kostiantyn Khorolskyi (2018). Innovative Functional Food Products for the Workers of the Mining Industry. Journal of Hygienic Engineering and Design, Vol. 24, pp. 55–62.

9. Valentyn Khorolskyi, Svitlana Yermak, Aleksandr Bavyko, Yuriy Korenets, Nataliia Riabykina (2018). Technological Complex of Automated Control and Management of Water Purification and Bread Production with Robotic Technologic Intensifiers. Journal of Hygienic Engineering and Design, Vol. 25, pp. 112–120.

**References**

1. Upravlinnia innovatsiinym rozvytkom pidpryiemstv rehionu z tekhnohennymy terytoriiamy / V.P. Khorolskyi, O.V. Khorolska, K.D. Khorolskyi, K.H. Riabykina, N.I. Riabykina, I.P. Diianov, A.V. Romaniv, D.D. Haidai / za red. prof. V.P. Khorolskoho. – Kryvyi Rih : Vydavets FOP Cherniavskyi D.O. – 2018. – 496 s.

2. Antoniuk O.P. Prohnozuvannia obsiahiv ekonomichnoho vidshkoduvannia naslidkiv tekhnohennoho zabrudnennia kryvorizkoho rehionu : monohrafiia / O.P. Antoniuk, I.M. Pistunov. – Dnipropetrovsk : Natsionalnyi hirnychyi universytet, 2013. – 18 s.

3. Ekologicheskie i socialno-gigienicheskie problemy i puti ozdorovleniya krupnogo promyshlennogo regiona : monogr. / [A.E. Lysyj, S.A. Ryzhenko, I.P. Kazyarin i dr.] – Krivoj Rog : OOO «Etyud-Servis», 2007. – 428 s.

4. Ponomarenko V.M. Problemy udoskonalennia systemy upravlinnia v haluzi okhorony zdorovia i shliakhy yikh vyrishennia / V.M. Ponomarenko, O.M. Tsiborovskyi // Visnyk sotsialnoi hihiieny ta orhanizatsii okhorony zdorovia. – 2003. – № 2. – S. 5–8.

5. Dorf R. Sovremennye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop ; per.s angl. B.I. Kopylova. – M. : Laboratoriya Bazovyh Znanij, 2004. – 832 s.

6. Aamodt A. Cose-Based Reasonig: Foundational Issues, Methodological Variations and System Approaches / A. Aamodt, E. Plaza // Artifical Intelli Genes Communications IOS Press. – 1994. – Vol. 7. № 1. – P. 39–59.

7. Uossermen F. Nejrokompyuternaya tehnika: Teoriya i praktika / Uossermen F. – M. : Mir, 1992.

8. Valentyn Khorolskyi, Aleksandr Bavyko, Svitlana Yermak, Yekateryna Riabykina, Kostiantyn Khorolskyi (2018). Innovative functional food products for the workers of the mining industry. Journal of Hygienic Engineering and Design, Vol. 24, pp. 55-62

9. Valentyn Khorolskyi, Svitlana Yermak, Aleksandr Bavyko, Yuriy Korenets, Nataliia Riabykina (2018). Technological complex of automated control and management of water purification and bread production with robotic technologic intensifiers. Journal of Hygienic Engineering and Design, Vol. 25, pp. 112-120.

Рецензія/Peer review : 24.06.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. О.С. Зеленський

DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-227-241
УДК 521.1:539.12.01:539.142:629.039.58

Ю.П. ЗАСПА
Хмельницький національний університет

# КОРПУСКУЛЯРНО-ВИХОР-ХВИЛЬОВІ ТЕРМОКОМПЛЕКСИ (ТРІОНИ) В ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ: ТЕХНІЧНИХ, КОСМІЧНИХ, ПСЕВДОЕЛЕМЕНТАРНИХ, БІОЛОГІЧНИХ. ЯДРО ЗЕМЛІ: ЧАВУН, РІДКИЙ ВУГЛЕЦЬ ТА АЛМАЗИ. ВЕЛИКИЙ АДРОННИЙ КОЛАЙДЕР: ГАРЯЧА ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРОТОНІВ. ХМАРА ООРТА: ХОЛОДНИЙ КОЛАПСНИЙ ГЕНЕРАТОР КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ ТА ДЖЕРЕЛО МІКРОХВИЛЬОВОГО ФОНОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Встановлені фізичні механізми утворення та трансформації корпускулярно-вихор-хвильових термокомплексів, іменованих тріонами, в найрізноманітніших галузях техніки, геофізики, астрофізики, космології, фізики ядра та псевдоелементарних частинок, а також біофізики.*

*Ключові слова: тріони, хітонне випромінювання.*

YU. P. ZASPA
Khmelnytsky National University
e-mail: zaspa_yuriy@ukr.net

## CORPUSCULAR-VORTEX-WAVE THERMOCOMPLEXES (TRIONES) IN HETEROGENIC SYSTEMS: TECHNICAL, COSMIC, PSEUDOELEMENTARY, BIOLOGICAL. CORE OF EARTH: CAST IRON, LIQUID CARBON AND DIAMONDS. LARGE HADRON COLLIDER: HOT TRANSFORMATION OF PROTONS. OORT CLOUD: COLD COLLAPSE GENERATOR OF COSMIC RAYS OF ULTRAHIGH ENERGY AND SOURCE OF MICROWAVE COSMIC BACKGROUND RADIATION

*The physical mechanisms of the formation and transformation of corpuscular-vortex-wave thermocomplexes, called triones, in various fields of technology, geophysics, astrophysics, cosmology, nuclear and pseudoelementary particles physics, as well as biophysics are established. The dynamics of triones in the core, mantle, cortex, hydrosphere, atmosphere and the plasmospace of the Earth is analyzed in the article. The collapse mechanisms of generation of cosmic rays of medium, high and ultrahigh energies, solar activity, solar corona heating and solar neutrino deficiency are established by the author. A new model of pseudoelementary particles as corpuscular-vortex-wave thermocomplexes is proposed. Disastrous functioning modes of nuclear and thermonuclear power engineering, hydropower and aerodynamic systems, which are related to the dynamics of thermal complexes are considered.*

*Key words: triones, heaton radiation.*

### Вступ

Теплове випромінювання зазвичай асоціюється з електромагнітним полем [1–3]. Наявність квазірівноважного теплового випромінювання сильного та слабкого полів аж ніяк не вписується в домінуючі нині стандартні фізичні моделі [4–6]. Однак, це топологічно узгоджується з запропонованою в [4] об'єднаною моделлю фундаментальних фізичних полів. Нижче розглядаються корпускулярно-вихор-хвильові термокомплекси, що кооперують вихор-хвильову масу $m$, приєднану до неї корпускулярну масу $M$ та квазірівноважне теплове випромінювання сильного і слабкого полів. Такого роду триєдині структури іменуватимемо тріонами (trione), а зазначене теплове випромінювання – хітонним (heaton), відділяючи таким чином його від добре відомого електромагнітного теплового випромінювання. На конкретних прикладах стосовно різних фізичних та технічних проблем буде доведена важливість таких термокомплексів, не помічених досі апологетами сучасних фізичних теорій.

Основні співвідношення

Нижче наводяться основні математичні співвідношення для опису тріонів:

$$x\cdot e^{x}-5\cdot(e^{x}-1)=0,\quad b=\frac{ch}{4,965k},\quad \lambda=\frac{h}{m\upsilon}=\frac{b}{T}=\frac{ch}{4,965kT} \tag{1–3}$$

$$\upsilon=(\frac{2kT}{M})^{1/2}=\frac{hT}{mb}=\frac{4,965kT}{mc},\quad \frac{\upsilon}{c}=\frac{4,965kT}{mc^{2}} \tag{4, 5}$$

$$M=\frac{2}{kT}\cdot(\frac{mc}{4,965})^{2},\quad \frac{Mc^{2}}{mc^{2}}=\frac{2}{(4,965)^{2}}\cdot\frac{mc^{2}}{kT}=\frac{2}{4,965}\cdot\frac{c}{\upsilon} \tag{6, 7}$$

$$\nu_{he}=\frac{\upsilon}{\lambda},\quad h\nu_{he}=\frac{(4,965kT)^{2}}{mc^{2}},\quad \frac{h\nu_{he}}{4,965kT}=\frac{4,965kT}{mc^{2}} \tag{8–10}$$

$$\lambda = \pi \cdot d,\ \rho = \frac{6M}{\pi d^3} = \frac{6\pi^2 M}{\lambda^3},\ \ m = \frac{\hbar}{kT}\left(\frac{\rho ch}{14,895}\right)^{1/2},\ \ M = \frac{\rho}{6\pi^2}\left(\frac{ch}{4,965kT}\right)^3 \quad (11\text{–}14)$$

$$T = \frac{\hbar}{km}\cdot\left(\frac{\rho ch}{14,895}\right)^{1/2},\ \ \rho = \frac{59,58}{ch^3}(\pi mkT)^2 \quad (15, 16)$$

$$\rho = 12\left(\frac{\pi}{\upsilon}\right)^2\cdot\left(\frac{4,965}{ch}\right)^3\cdot(kT)^4,\ \ \upsilon = 2\pi\left(\frac{3}{\rho}\right)^{1/2}\cdot\left(\frac{4,965}{ch}\right)^{3/2}\cdot(kT)^2 \quad (17, 18)$$

$$\rho = 12\left(\frac{\pi}{\nu_{he}}\right)^2\cdot\left(\frac{4,965}{ch}\right)^5\cdot(kT)^6,\ \ \nu_{he} = 2\pi\left(\frac{3}{\rho}\right)^{1/2}\cdot\left(\frac{4,965}{ch}\right)^{5/2}\cdot(kT)^3 \quad (19, 20)$$

$$\lambda^2\cdot\nu_{he} = \frac{h}{m} = 4\pi\cdot N_{ch}\cdot\nu_{co}\cdot\left|\cos\theta\right|,\qquad \left|\cos\theta\right| = \frac{h}{4\pi N_{ch}\cdot m\cdot\nu_{co}} \quad (21, 22)$$

Тут $x$ – корінь трансцендентного рівняння (1) для визначення сталої Віна $b$ [3], $k, h(\hbar)$ – сталі Больцмана та Планка, $c$ – швидкість світла у вакуумі, $\upsilon, \lambda$ – групова швидкість та довжина хвилі структури, $T$ – абсолютна температура, $\nu_{he}$ – частота хітонних збуджень, $d$ – ефективний діаметр структури, $\rho$ – густина корпускулярно-польової маси $M$, $N_{ch}$ – параметр когерентності, $\nu_{co}$ – кооперативна в'язкість системи, $\theta$ – кут між дійсною та уявною компонентами хвильового вектору [4].

Хвильовий характер об'єднання представлений формулою де Бройля у (3), однак, з тим суттєвим зауваженням, що маса $m$ не залежить тут від швидкості, а сама групова швидкість $\upsilon$ може бути як меншою, так і більшою (або ж рівною) швидкості світла у вакуумі. Вихрові властивості комплексу опосередковано відображені у співвідношеннях (11, 12), а також безпосередньо через зв'язок $\rho$ з завихореністю вектор-потенціалу поля [4]. Найбільш ймовірна теплова швидкість приєднаної маси $M$ згідно з (4) відповідає класичній статистиці Максвелла незалежно від швидкості (у т.ч. при $\upsilon \gg c$) – наперекір відомим догматам релятивізму, що абсолютизують Лоренц-інваріантні форми полів [1, 2, 5]. Абсолютна температура $T$ тут виступає об'єднуючим параметром, визначаючи одночасно як теплову швидкість приєднаної маси, так і довжину хвилі структури згідно з законом Віна у (3). Як видно, ця довжина хвилі напряму співвідноситься з найбільш ймовірною довжиною хвилі у спектрі рівноважного електромагнітного теплового випромінювання, відповідного температурі $T$.

**Динаміка тріонів**

Квазірівноважний характер термокомплексів дозволяє використати тут поняття температури $T$, цілком коректне лише для рівноважних систем (хоча б локально). Однак, саме нерівноважність тріонів визначає їх внутрішню колективну динаміку. Ця динаміка раніше описувалась в термінах кооперативних хвиль та енергетичних каскадів [4]. Прямий каскад тут забезпечується колапсом, що має пряме відношення до катастроф у технічних системах [7]. При колапсі тріонів різко зростає температура та зменшується довжина хвилі $\lambda$. Обернений енергетичний каскад (в бік великих часових та просторових масштабів) пов'язаний з хітонним випромінюванням тріонів. Особливо слід відмітити різницю у характері впливу на матеріальне середовище хітонного випромінювання сильного та слабкого полів. Якщо розширення вихор-хвильових хітонів сильного поля веде до охолодження середовища, то розширення хітонів слабкого поля – навпаки, до його нагріву. Формально це пов'язано зі зміною знаків перед струмовими складовими у відповідних аналогах рівнянь Максвелла для сильного і слабкого полів [4]. Зауважимо, що сильне поле взаємодіє з частинками середовища через їх масу та спін, в той час як слабке – через електричний заряд та магнітний момент. В щільних середовищах зазвичай переважає вплив сильного поля. Однак, у розрідженій плазмі вплив хітонного випромінювання слабкого поля може стати визначальним - передусім, на електрони, відношення $e/m$ для яких на три порядки вище, ніж для протонів. Цим пояснюється зокрема висока температура сонячної корони та геліосфери, нагрів магнітосфери Землі. Навпаки, присутність холодних щільних протуберанців в короні Сонця свідчить про «реванш» сильного поля. Магнітне поле Землі, Сонця та інших космічних об'єктів є хітонною компонентою слабкого поля, а не електромагнітного, як традиційно вважають. Глибинна геодинаміка, пов'язана передусім з сильним полем, характеризується значно тривалішими періодами часових варіацій щодо динаміки магнітного поля Землі. В спіральних галактиках структури магнітного поля зміщені щодо зоряних рукавів [8], а холодні щільні хмари молекулярного водню (сильне поле) відносно незалежні щодо гарячих масивів іонізованого газу (слабке поле). В Сонячній системі сучасна фізика впритул не помічає охолоджені хітонні структури сильного поля на кшталт Головного поясу астероїдів, поясу Койпера, Розсіяного диску і т.п. Вони поміщені в гарячий магнітослабкий хітон геліосфери. Окремо слід відмітити хітонний холод далекої Хмари Оорта, що заслуговує особливої уваги в контексті встановлення істинної природи космічних променів надвисоких енергій та мікрохвильового фонового випромінювання (розглядається нижче).

Кооперативна взаємотрансформація хітонних форм сильного та слабкого полів в процесі оберненого енергетичного каскаду супроводжується випромінюванням відповідних за частотою

електромагнітних хвиль суцільного степеневого спектру [1]. Це випромінювання зазвичай помилково відносять на рахунок магнітно-гальмівного (синхротронного) випромінювання електронів у зовнішньому магнітному полі [1]. Ілюзорні магнітогідродинамічні моделі [1 9, 10] радіогалактик, квазарів, пульсарів, барстерів, струменевих викидів з ядер галактик і т.п. цілком ігнорують динаміку макроскопічних теплових форм сильного та слабкого полів.

**Склад та структура ядра Землі**

Відомий дефіцит густини внутрішнього та зовнішнього ядер Землі цілком слушно намагаються пояснити наявністю легких елементів, у т.ч. вуглецю [11-13]. Однак, розгляд зазвичай ведеться в рамках гомогенних моделей, які не враховують всієї специфіки задачі. Як доводить аналіз, під час утворення термокомплексів в ядрах Землі у якості маси $m$ слід взяти масу атома вуглецю ($m$≈12 а.о.м.). В такому випадку при $\rho \approx 13 \cdot 10^3$ кг/м$^3$ (тверде ядро) з (15) слідує оцінка температури в межах $T$≈5000-5100 °К всередині твердого ядра, що суттєво нижче відомих значень [1, 11-13]. При $\rho \approx 10 \cdot 10^3$ кг/м$^3$ на границі рідке ядро-мантія [1] матимемо $T$≈4400-4500 °К для рідкого ядра та при $\rho \approx 5,5 \cdot 10^3$ кг/м$^3$ для суміжних зон мантії $T$≈3300 °К. За наведених вище умов, відповідно до діаграми станів вуглецю [14], тверде ядро містить гетерофазну суміш: чавун (3–7 ваг. % вуглецю) – рідкий вуглець з алмазними пропантами з розміром кристалів $d$≈0,2 мкм. Наявність рідкої фази, власне, й пояснює суттєво занижену швидкість сейсмічних хвиль в «твердому» ядрі Землі [11–13]. Нещодавно відкритий внутрішній розрив твердого ядра [15] та просторова анізотропія швидкостей сейсмічних хвиль у твердому ядрі [16] відповідають топології відповідних гетерогенних границь, на яких концентруються та колапсують тріонні термокомплекси. Колапсна трансформація енергії спокою Землі на цих та інших внутрішніх границях є основним рушієм глибинної геодинаміки [17]. За умов рідкого ядра вуглець частково розчинений у залізі, частково – у вигляді алмазів сконцентрований на границі з мантією. Звідти вони плюмами транспортуються до верхньої мантії та кори.

**Мантія, кора Землі, гідросфера та біосфера**

Температурні поля мантії цілком визначаються динамікою термокомплексів. Для верхньої мантії у (15, 16) слід прийняти $m$≈18 а.о.м. (вода), що ставить у відповідність густину та температуру земних надр. Отже, глибинна геодинаміка, плюм- та плейт-тектоніка, сейсмічність та вулканізм мають не лише конвективну [18], а й корпускулярно-вихор-хвильову природу. Колапс тріонів розкриває тріщини в земних породах, що заповнюються водою та пропантами. Це пояснює у т.ч. підвищену електропровідність зон розломів та тріщинності [19].

У гідросфері звернемо увагу на вельми специфічний механізм довготривалої терморегуляції клімату Землі – термокомплекси залізо-марганцевих конкрецій Світового океану. За елементного складу конкрецій Mn(22,3-23,5%), Fe(4,5-5,6%), Co(0,19-0,22%), Ni(1,24-1,54%), Cu(1,0-1,17%), Zn(0,113-0,117%) [20] отримуємо в середньому $m$≈55,6 а.о.м. Тоді за густини придонної океанічної води $\rho \approx 1,05 \cdot 10^3$ кг/м$^3$ з (15) слідує значення температури $T$≈310 °К (≈36,7 °С), що за дивним збігом обставин практично співпадає з середньою температурою людського тіла та значно перевищує середню температуру океану. Зауважимо у цьому контексті, що існуючі на сьогодні плани широкого видобутку цінних металів з цих конкрецій можуть нанести клімату Землі значно більшу шкоду, ніж гіпертрофована проблема парникових викидів [17].

Тріонні термокомплекси мають безпосереднє відношення до живої природи. Наведемо приклад, що стосується кожного з нас: щодо руху еритроцитів капілярами крові. Виходячи з густини крові в межах $\rho \approx (1,05-1,06) \cdot 10^3$ кг/м$^3$ при $m$≈55,85 а.о.м. (іон заліза) з (15) отримаємо значення температури $T$≈309 °К (≈36,3 °С). При цьому з (4) слідує швидкість $v \approx 7.6 \cdot 10^{-4}$ м/с, яка добре узгоджується з клінічними нормами швидкості руху еритроцитів капілярами крові. Це ж значення швидкості, характерне для придонних шарів води Світового океану, визначає квазітисячолітні малі льодовикові періоди в історії Землі [17].

**Геодинамічні хвилі**

На рис. 1 наведені запозичені з роботи [21] залежності швидкостей міграції тихоокеанічних землетрусів від їх магнітуди. Низькошвидкісний кластер тут у середньому відповідає співвідношенню (4) при $m$≈18 а.о.м. (вода), $T$≈1300-1700 °К. Високошвидкісний кластер пояснюється колапсними процесами, що породжують сейсмічність. При цьому швидкість афтершоків може

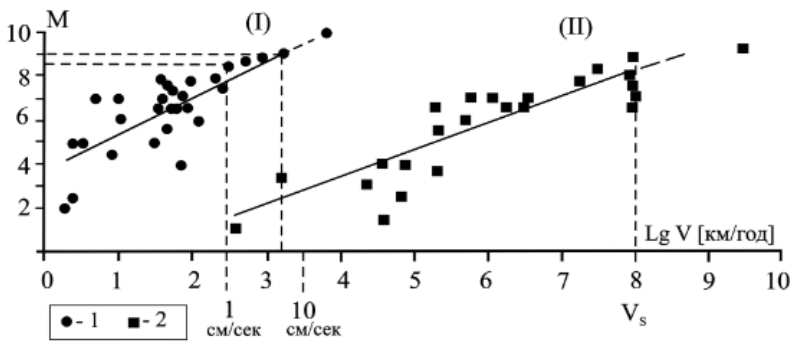



**Рис. 1. Залежності швидкостей міграції тихоокеанічних землетрусів від їх магнітуди [21]**

значно перевищувати зазначену у [21, 22] межу швидкості поперечних сейсмічних хвиль – крайня права точка на рис. 1, не пояснена авторами.

Незрозумілі в рамках існуючих фізичних концепцій різномасштабні часові варіації гравітаційного поля Землі та результатів вимірювань сталої всесвітнього тяжіння [17] пояснюються оберненим енергетичним каскадом хітонних вихор-хвильових форм сильного поля. Відповідний каскад в системі слабкого поля пов'язаний з наявними варіаціями магнітного поля Землі [1].

**Атмосфера, іоносфера та плазмосфера Землі.**

**Колапсна генерація космічних променів середніх та високих енергій**

Тепловий режим атмосфери Землі у значній мірі визначається динамікою термокомплексів. Для приземного шару повітря та нижньої тропосфери у (15, 16) слід прийняти $m \approx 2$ а.о.м. Аналіз співвідношень густина-температура для стандартної атмосфери доводить, що $m \approx 1$ а.о.м. на висотах тропопаузи. Отже, сама наявність тропопаузи атмосфери Землі пов’язана з термокомплексами на протонах. Це пояснює з-поміж іншого відомий прогин тропопаузи біля полюсів, де потоки протонів найінтенсивніші.

При $m \approx 2$ а.о.м. (молекулярний водень) та атмосферному тиску 760 мм рт. ст. з (15) слідує значення $T \approx 292^\circ$ К ($\approx 19^\circ$ С), за якого на основі (5) маємо: $v \approx 2,0$ см/с. Ця групова швидкість тропосферних мас у приземному шарі повітря відповідає періоду огинання периметру екватора $\approx 64$ роки, добре проявленому як у варіаціях глобальної температури атмосфери, так і в варіаціях частоти обертання Землі [1, 17], а також у варіаціях геомагнітного поля [1]. Карта температурних аномалій за останнє сторіччя демонструє явно виражену асиметрію в бік північної півкулі [17], що свідчить про формування відповідної вихор-хвильової хітонної структури сильного поля, сконцентрованого навколо північного полюсу. Поступовий розпад цієї структури визначає спад глобального потепління та перспективу чергового льодовикового періоду [17]. Прискорений дрейф північного магнітного полюсу в останні десятиріччя [17] пов'язаний з подібною топологічною структурою слабкого поля. Наразі вона поступово трансформується в інші глобальні магнітні форми, про що свідчить згасання динаміки дрейфу в останні роки.

Підіймання температури повітря за стратопаузою пов’язане з колапсним розпадом термокомплексів на основі мюонів. З (15, 16) слідує, що $m \approx m_\mu$ на висотах стандартної атмосфери ≈42 км. Колапс мюонних тріонів згідно з (6, 7) породжує космічні промені з енергією $M\upsilon^2/2 = Mc^2 \cdot (\upsilon/c)^2/2 \approx (3-4)\cdot 10^{15}$ еВ, відповідною до характерного максимуму у спектрі космічних променів високих енергій – рис. 2. При $m \approx m_\mu$ та за температурних умов на висоті $\approx 42$ км ($T \approx 255^\circ$ К) з (6, 7) слідує значення $Mc^2 \approx 4\cdot 10^{16}$ еВ. В такому випадку колапсні мюони набувають швидкості $\upsilon \approx 0,4\,c$. Цей механізм пояснює «аномально» високу присутність мюонів у т.з. широких атмосферних зливах [1, 2].

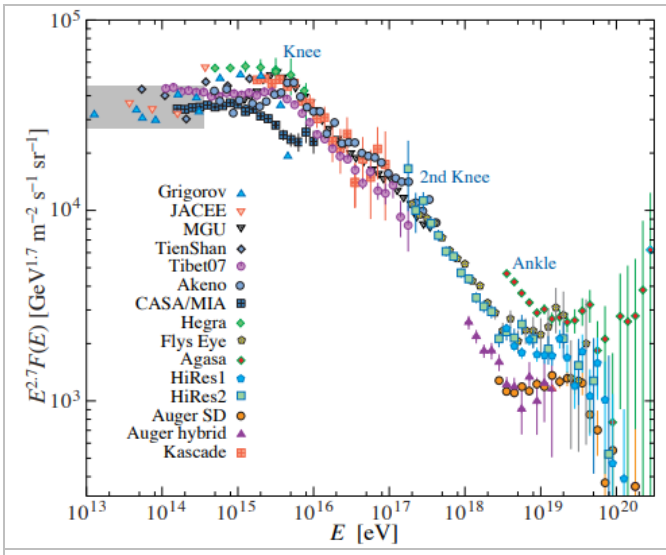



**Рис. 2. Спектри космічних променів високих та надвисоких енергій [23, 39]**

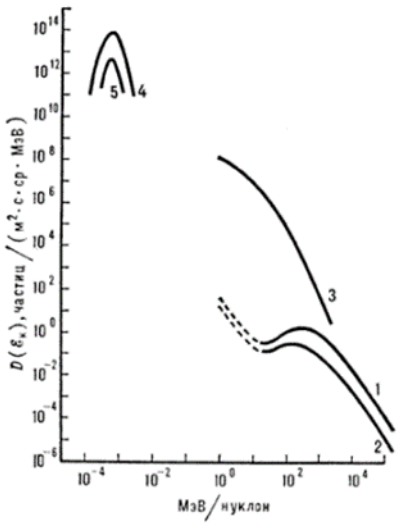



**Рис. 3. Спектри космічних променів середніх енергій ( криві 1, 2), а також сонячних космічних променів (крива 3) та сонячного вітру (криві 4, 5) [24]**

Космічні промені середніх енергій (рис. 3) генеруються колапсом тріонів на електронах у плазмосфері Землі. При теплових енергіях електронів у плазмосфері $\approx 0,3-1$ еВ [1] з (6, 7) слідує значення $Mc^2 \approx (2-7)\cdot 10^{10}$ еВ, яке приблизно на один-два порядки величини більше за характерні енергії максимума у спектрі космічних променів середніх енергій (рис. 3). Це відповідає значенням $\upsilon/c \sim 0,1-0,5$. Енергії колапсних електронів у зіткненнях передаються ядрам хімічних елементів плазмосфери, що веде до їх деструкції та прискорення. Це пояснює «аномально» високу присутність ядер

легких елементів у космічних променях середніх енергій [1, 2, 24]. Колапс електронних тріонів у плазмосфері Землі також є основним механізмом генерації частинок високих енергій, накопичених у радіаційних поясах планети.

Хітонні збудження в іоносфері та плазмосфері Землі з енергіями (9) знаходяться у частотному резонансі з поперечними електромагнітними хвилями у плазмі – за умови перевищення плазмової (ленгмюрівської) частоти [1]:

$$f_p = (\frac{ne^2}{\pi m_e})^{1/2} \text{ (система СГС)} \quad (23)$$

або ж у резонансі з іонно-звуковими хвилями у плазмі, що мають частоту, меншу за $f_p$. Тут $n$, $e$, $m_e$ – концентрація, заряд та маса електронів. Це пояснює «радіоспіви» [1] іоносфери в шарах *E* та *F*, а також свічення та полярні сяйва в іоносфері Землі.

**Колапсний механізм сонячної активності, нагріву сонячної корони та дефіциту сонячних нейтрино**

Основний квазіодинадцятилітній цикл сонячної активності безпосередньо пов'язаний з рухом корпускулярно-вихор-хвильових структур у поверхневих шарах конвективної зони Сонця, для яких характерні екстремуми температурного градієнту – рис. 4. При $T_1 \approx 1,02 \cdot 10^5$ °К, $T_2 \approx 0,8 \cdot 10^5$ °К для цих екстремумів на основі (4) отримуємо періоди огинання сонячної сфери хітонними збудженнями на основі протонів $\approx 9,7$ років та $\approx 12,6$ років, що цілком відповідає варіаціям часових рядів сонячної активності та в середньому становить $\approx 11$ років. Ці збудження корелюють за груповою швидкістю поширення з інерційними хвилями у відповідних шарах конвективної зони Сонця. Найглибший мінімум температурного градієнту при $T \approx 1 \cdot 10^4$ °К згідно з (4) відповідає характерному періоду сонячної активності близько ста років.

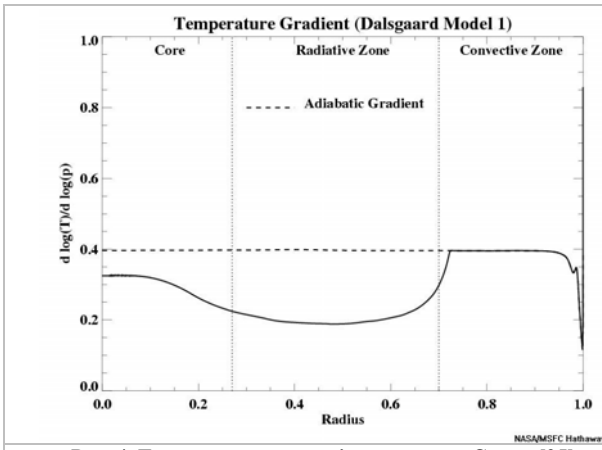



**Рис. 4. Температурний градієнт в надрах Сонця [25]**

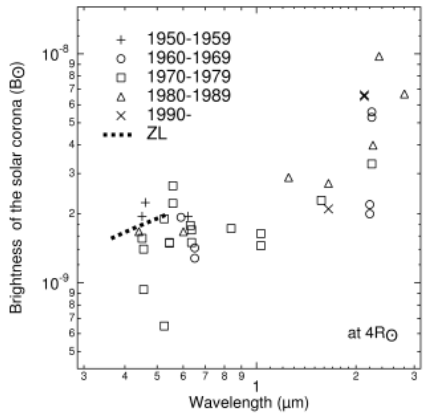



**Рис. 5. Залежності яскравості свічення сонячної корони від довжини хвилі [26]**

Сонячні спалахи та викиди ініціюються колапсом термокомплексів на електронах. Наприклад, на рис. 6 наведений (з-поміж іншого) рентгенівський спектр сильного сонячного спалаху з максимумом на довжині хвилі $\lambda \approx (5-6) \cdot 10^{-10}$ м. Він зазвичай інтерпретується як теплове випромінювання спалаху [1]. Однак, за законом Віна ця довжина хвилі співвідноситься з температурами $T \approx (5-6) \cdot 10^6$ °К, занадто низькими для потужного сонячного спалаху. Цей парадокс пояснюється частотним резонансом хітонних збуджень з поперечними електромагнітними хвилями у плазмі сонячної корони під час спалахів. Відповідна частота електронних хітонів $\nu = c / \lambda$ згідно з (9) співвідноситься з температурами $T \approx 8 \cdot 10^7$ °К, які характерні для потужного сонячного спалаху. За таких температур згідно з (6, 7) колапсно генеруються електрони з енергіями $M\upsilon^2 / 2 = Mc^2 \cdot (\upsilon^2 / c^2) / 2$, де $Mc^2 \approx 3$ МеВ. Передача цієї енергії від електронів до протонів та ядер інших елементів (при $\upsilon / c \sim 1$) пояснює характер спектру космічних променів, згенерованих при спалахах – рис. 3.

Видиме та інфрачервоне випромінювання сонячної корони зазвичай пояснюється присутністю пилу в короні [1, 26]. Між тим, характерні максимуми у спектрі корони на довжинах хвиль $\lambda \approx 0,45-0,65$ мкм та $\lambda \approx 2,1-2,3$ мкм (рис. 5) згідно з (9) відповідають температурам $T \approx (2,3-2,8) \cdot 10^6$ °К та $T \approx (1,2-1,3) \cdot 10^6$ °К. Частотний резонанс з поперечними електромагнітними хвилями у плазмі сонячної корони візуалізує топологічні структури слабкого поля, що забезпечують ці температури. В такому

контексті виникає питання щодо джерел космічного пилу в сонячній короні, Зодіакальній та інших пилових хмарах Сонячної системи, пилових кільцях поблизу орбіт Землі та Венери, в гігантському кільці Феби навколо Сатурна та ін. [41]. Цим джерелом виступає саме колапс тріонів.

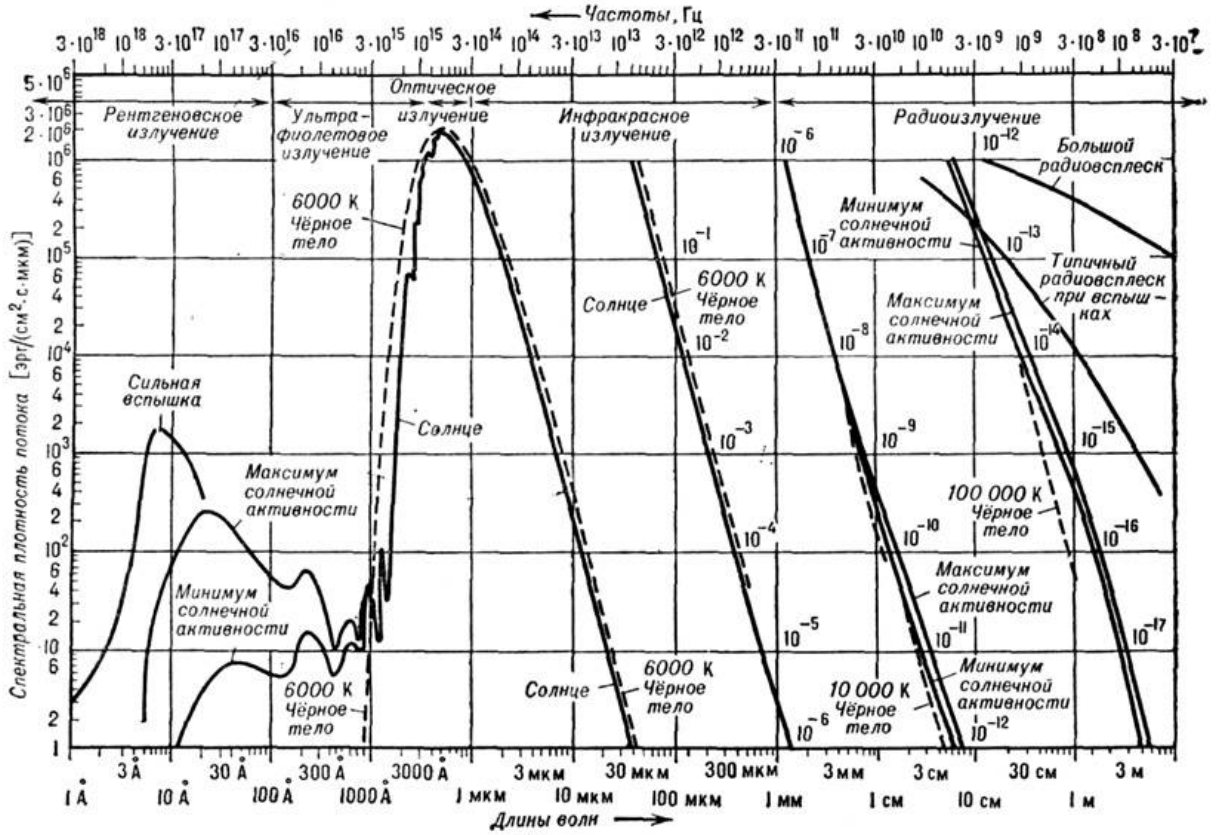



**Рис. 6. Спектри випромінювання Сонця [1]**

Недолуге «вирішення» застарілої проблеми дефіциту сонячних нейтрино через механізм нейтринних осциляцій фактично приховало справжні корені цієї проблеми [27]. За умов сонячного ядра ($T \approx 1,6 \cdot 10^7$ °К, $\rho \approx 1,6 \cdot 10^5$ кг/м$^3$ [1]) з (13, 14) слідують наступні значення: $m \approx 12$ МеВ, $M \approx 9$ ГеВ. Перше з них (вихор-хвильова маса) фактично співпадає з максимумом енергетичного спектру борних нейтрино, що реєструвались у класичних експериментах: хлор-аргонному, Каміоканде та Суперкаміоканде [27]. Колапс нейтринних тріонів, власне, й пояснює двократний – трикратний дефіцит сонячних нейтрино у цих експериментах. Дещо менший дефіцит основних низькоенергетичних *pp*-нейтрино від Сонця теж, бодай частково, пов'язаний з колапсом нейтринних тріонів при $m \approx 0,4$ МеВ, $M \approx 10$ МеВ. Однак, основна проблема – у недосконалості стандартної сонячної моделі, яка цілком спирається на термоядерний механізм енергопостачання Сонця. Між тим зменшення маси спокою Сонця шляхом трансформації тріонів більш ніж на порядок величини перевищує темп втрати маси через ядерні реакції синтезу. Це прямо слідує з динаміки збільшення середньої відстані від Землі до Сонця (астрономічної одиниці довжини) [17]. Для порівняння: енергетичний еквівалент зменшення маси спокою Землі шляхом трансформації тріонів в надрах на 7 порядків величини перевищує енергопостачання Землі шляхом сонячного опромінення [17].

**Хмара Оорта як холодний колапсний генератор космічних променів надвисоких енергій та джерело мікрохвильового фонового випромінювання**

Джерела космічних променів надвисоких енергій шукають де завгодно, тільки не в Сонячній системі [28–31]. Однак, ці потуги не можуть зрівнятись за рівнем зухвалості з доктриною т.з. Великого вибуху [1, 5, 6, 32]. Одним з «підтверджень» останнього вважається існування термодинамічно рівноважного мікрохвильового космічного випромінювання ($T \approx 2,726$ °К), названого врешті «реліктовим» - з подачі Йосипа Шкловського на честь того ж таки великого вибуху [1, 32].

Однак, як виявилось, існує значно прозаїчніше, зате реальне, джерело мікрохвильового фонового випромінювання, а також космічних променів надвисоких енергій. Ним виявилась вельми віддалена і холодна Хмара Оорта, більш відома як постачальник довгоперіодних комет. При $T \approx 2,726$ °К, $m \approx 1$ а.о.м. (протон) з (6, 7) слідує значення $Mc^2 \approx 3 \cdot 10^{20}$ еВ, що приблизно на порядок перевищує енергію характерного максимуму у спектрі космічних променів надвисоких енергій (рис. 2): $M\upsilon^2 / 2 = Mc^2 \cdot (\upsilon^2 / c^2) / 2 \approx 4 \cdot 10^{19}$ еВ. За цих

умов групова швидкість колапсних протонів становить $\upsilon \approx 0,5\,c$.

Енергетичним джерелом цих процесів виступає холодне хітонне випромінювання сильного поля Хмари Оорта, що трансформується колапсом до енергетичних температур $\sim 5 \cdot 10^{23}$ °К. Цей формальний температурний рекорд колапсу можливий завдяки оберненій залежності приєднаної маси *M* від температури у (6) – вельми несподіваній для шукачів екстремальних джерел космічних променів надвисоких енергій.

Варто зауважити, що широко відома дипольна анізотропія мікрохвильового фонового випромінювання обумовлена не розширенням Всесвіту [1, 32], а направленим рухом галактичної та метагалактичної плазми відносно Хмари Оорта. Як доводить аналіз спектрів космічних променів надвисоких енергій (рис. 2), колапс тріонів на ядрах гелію, що входять до цієї плазми разом з протонами, з легкістю долає т.з. ГЗК – обрізання спектру космічних променів (всередині ГЗК-сфери) [1, 31]. При $m \approx 4$ а.о.м. згідно з (6, 7) генеруються промені з енергіями $\sim 10^{21}$ еВ.

В розріджених космічних середовищах (Хмара Оорта, сонячна корона та геліосфера, плазмосфера Землі і т.п. ) розраховані за співвідношеннями (16,17,19 ) густини термокомплексів значно перевищують матеріальну густину середовища. Це свідчить про утворення приєднаної маси *M* за рахунок своєрідного скраплення ( конденсації ) хітонного поля. Вихор-хвильова маса *m* відіграє у цьому відношенні роль центрів конденсації поля.

**Динаміка тріонів в технічних системах**

У зв'язку з цілковитою відсутністю знань про тріони як форму організації матерії та поля, прояви такого роду динаміки асоціюються з катастрофами [7]. Найбільш масштабно це проявилось на ЧАЕС, де необхідні елементи сильного та слабкого полів були забезпечені самим технологічним процесом та його безглуздою корекцією в ході виконання експерименту з вибігу турбогенератора [7]. Щодо потужних альтернативних енергетичних установок термоядерного характеру відмітимо у цьому контексті найбільшу технічну невдачу в галузі керованого термоядерного синтезу з магнітним утриманням плазми – периферійний зрив реакції синтезу на найбільшому у світі реакторі JET в жовтні 1997 р. [33]. З графіків, показаних на рис. 7, чітко видно, що приблизно за півсекунди до зриву температура іонів пішла на спад, в той час як температура електронів зростала впритул до моменту дотику плазми до стінок робочої камери. Це цілком узгоджується з зазначеною вище температурною динамікою оберненого енергетичного каскаду в системах сильного та слабкого полів. Відсутність знань щодо цих фізичних механізмів вже фактично поставила крапку на перспективі магнітного утримання термоядерної плазми (після невдачі на JET). Стеларатори, що експлуатуються нині в експериментальному режимі, розраховані за співвідношеннями магнітної гідродинаміки, що цілком ігнорують хітонне випромінювання та каскадний транспорт енергії в системах фундаментальних полів [4].

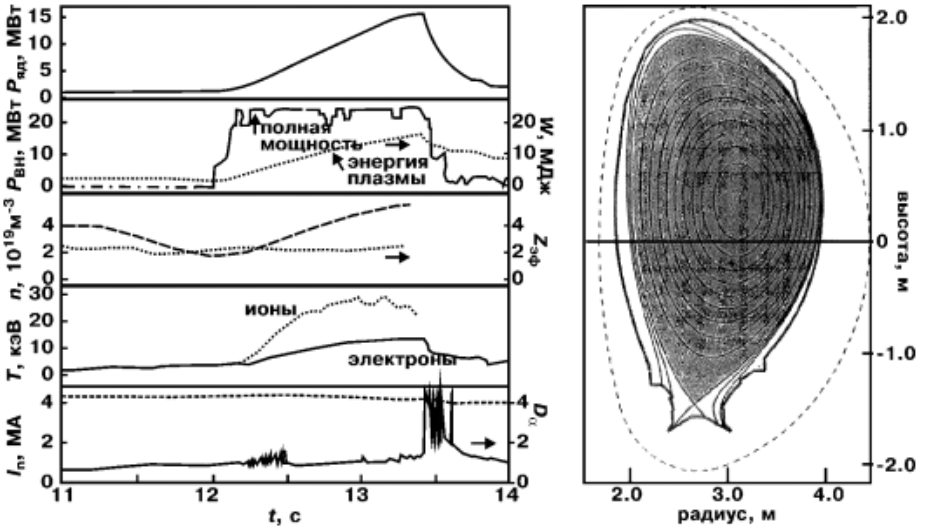



**Рис. 7. Динаміка параметрів та схема магнітних поверхонь термоядерної плазми реактора JET [33]**

Повертаючись до механізмів найбільшої в гідроенергетиці Саяно-Шушенської катастрофи [7], зауважимо, що при $m \approx 56$ а.о.м. (атом заліза) та густині прісної води $\rho \approx 1,0 \cdot 10^3$ кг/м$^3$ з (15) слідує значення температури $T \approx 301$ °К ($\approx 28$ °С) в пограничних шарах лопаток направляючого апарату, колон статора та лопастей турбіни, де формуються тріони на основі заліза. Ці термокомплекси, власне, й перегрівають воду в напірних водосховищах ГЕС. Наприклад, водосховище Красноярської ГЕС за роки її експлуатації фактично перестало замерзати в зимню пору року, що створило ряд суттєвих екологічних проблем. Вище наведеним значенням *m*, *T* згідно з (9) відповідає частота хітонних збурень $\nu_{he} \approx 76$ Гц, яка безпосередньо проявлена (разом з другою гармонікою) на віброспектрах з лопаток направляючого апарату гідротурбін СШГЕС [7, 34].

Торкаючись катастрофічних процесів в аеродинаміці, відмітимо решітчастий флаттер лопаток турбомашин. На рис. 8 наведені спектри віброколивань лопаток турбовентилятора в режимах катастрофічного флаттеру [35]. Характерні частоти флаттеру $\approx 900-1100$ Гц та $\approx 500-600$ Гц безпосередньо відповідають частотам хітонних збурень (співвідношення (9)) при $m \approx 4$ а.о.м. (гелій), $T \approx 290$ °К для повітря та $m \approx 48$ а.о.м. (титан), $T \approx 750$ °К для лопаток з титанового сплаву. При цьому тиск повітряного потоку на лопатки оцінюється приблизно у 4 атмосфери. Колапс тріонів на основі гелію (який входить до складу повітря), комбінуючись у пограничному шарі з колапсом тріонів на основі титану, розкриває втомні тріщини на лопатках [35] та врешті призводить до аварійного долому лопаток.

**Рис. 8. Спектри віброколивань лопаток турбовентилятора в режимах катастрофічного флаттеру [35]**

Для повноти аналізу наведемо власні експериментальні результати щодо динаміки тріонів в твердотільних контактних системах. На рис. 9 показані спектри акустичної емісії процесів різання сталей на токарному верстаті в динамічно навантаженому режимі бафтингу-флаттеру-колапсу. Явно виражені флаттерні піки на частоті $\approx 2,8$ кГц та на її другій гармоніці ($\approx 5,6$ кГц) відповідають хітонним збудженням на основі атомів вуглецю (що входять до складу сталей): $m \approx 12$ а.о.м. Значно менш виражені піки на частоті $\approx 600$ Гц та її субгармоніках обумовлені термокомплексами на атомах заліза ($m \approx 56$ а.о.м.). Додатковим підтвердженням тріонного механізму збудження інтенсивних контактних віброколивань стала безпосередня реєстрація наведеного магнітно-слабкого поля в процесі різання сталей [36].

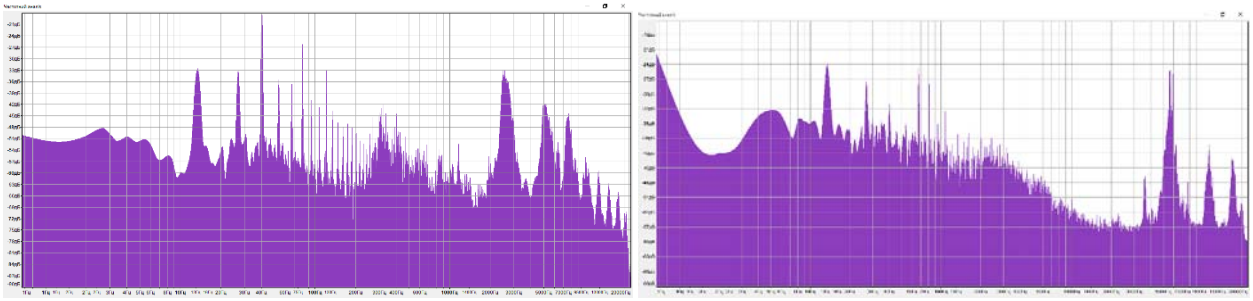


**Рис. 9. Спектри акустичної емісії процесів різання сталей в умовах переважного бафтингу (зліва) та флаттеру (справа)**

**Псевдоелементарні частинки як термокомплекси**

Широко розтиражована сучасна стандартна модель фундаментальних взаємодій [1, 5, 6] базується на обміні віртуальними частинками. Нижче розглядається альтернативна структура псевдоелементарних частинок як термокомплексів. Для зручності описання наведемо деякі додаткові співвідношення:

$$\frac{h\nu_{he}}{mc^2} = (\frac{\upsilon}{c})^2, \quad \frac{h\nu_{he}}{Mc^2} = \frac{4,965}{2}(\frac{\upsilon}{c})^3 \qquad (24, 25)$$

Як видно, відносна енергія хітонних збуджень в тріаді термокомплексу різко зростає зі збільшенням відношення $\frac{\upsilon}{c}$. Останнє визначається взаємодією частинки з іншими. За відсутності такої взаємодії (у стані спокою) латентно зберігається вихор-хвильова маса $m$, а приєднана маса $M$ вважається масою спокою. Для стабільних частинок хітонне випромінювання знаходиться в рівновазі з матерією. В процесі взаємодії розмір частинки та її температура змінюються, однак густина $\rho$ вважається постійною.

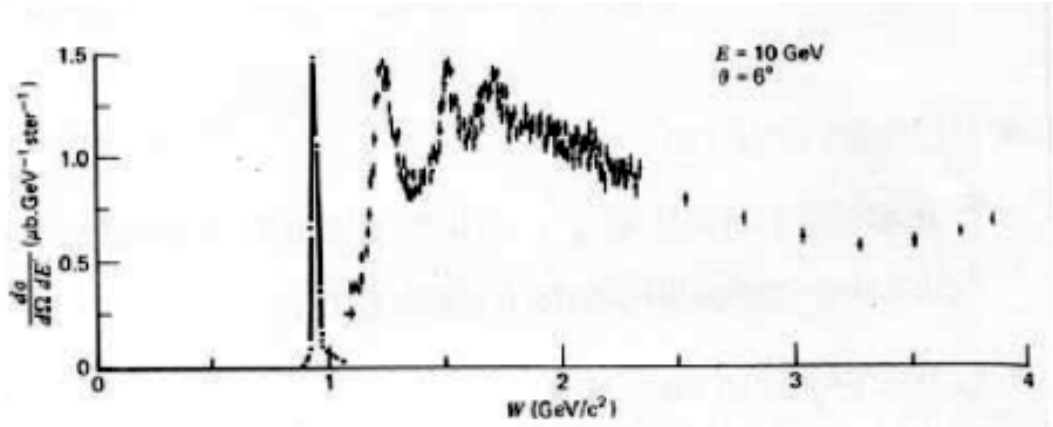



**Рис. 10. Енергетичні спектри розсіяння електронів на протонах ( J.I. Friedman, H.W. Kendall, R.E. Taylor ) [37]**

Проілюструємо такий підхід на конкретних прикладах. На рис. 10 наведені класичні результати щодо розсіяння електронів на протонах, які надихнули авторів кваркової (партонної) моделі адронів [1, 2, 37]. Наявність трьох піків непружного розсіяння (додатково до пружного) пов'язується тут з трьома базовими типами кварків. Однак, можлива цілковито інша інтерпретація цих експериментальних результатів. Згідно зі співвідношенням (12) при середньоквадратичному зарядовому радіусі протона $r_p \approx 8{,}14 \cdot 10^{-16}$ м [1] його густина складає $\rho_p \approx 7{,}4 \cdot 10^{17}$ кг/м$^3$, а температура згідно з (3) становить $T_p \approx 5{,}7 \cdot 10^{11}$ °К. При цьому $Mc^2 \approx 938$ МеВ, $mc^2 \approx 750$ МеВ, $\upsilon_p / c \approx 0{,}32$. В цих розрахунках за основу береться вказане значення $r_p$, отримане в ранніх експериментах, оскільки більш пізні результати [38] вважаються суттєво завищеними. При непружному розсіянні електронів на протонах згідно з даними рис. 10 радіус протона збільшується за рахунок приєднання поля налітаючих електронів при відповідному зменшенні температури та збереженні густини $\rho_p$. В такій інтерпретації пікам непружного розсіяння на рис. 10 відповідають приєднані маси $M_1c^2 \approx 1{,}2$ ГеВ, $M_2c^2 \approx 1{,}5$ ГеВ, $M_3c^2 \approx 1{,}7$ ГеВ. Цим масам згідно з (14) співставляються температури протона $T_1 \approx 5{,}2 \cdot 10^{11}$ °К, $T_2 \approx 4{,}8 \cdot 10^{11}$ °К, $T_3 \approx 4{,}7 \cdot 10^{11}$ °К. На основі (5–7) отримуємо значення відповідних вихор-хвильових мас (в енергетичних одиницях): $m_1c^2 \approx 0{,}82$ ГеВ, $m_2c^2 \approx 0{,}88$ ГеВ, $m_3c^2 \approx 0{,}92$ ГеВ та відповідних відношень: $\upsilon_1 / c \approx 0{,}28$, $\upsilon_2 / c \approx 0{,}24$, $\upsilon_3 / c \approx 0{,}22$. При цьому максимум суцільного спектру енергетичних мас на рис. 10 (ніяк не пояснений авторами кваркових моделей) при $Mc^2 \approx 1{,}83$ ГеВ відповідає значенню $mc^2 \approx 938$ МеВ, рівному енергії спокою протона.

**Нуклонний резонанс**

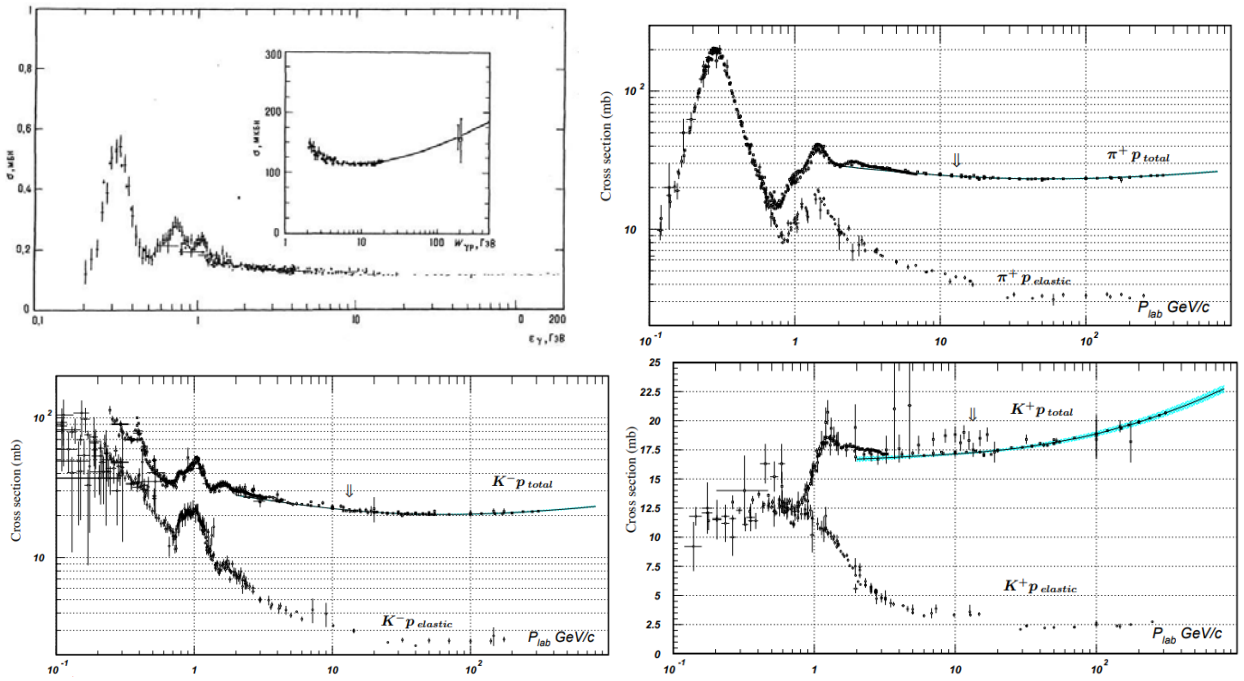



**Рис. 11. Спектри розсіяння гамма-квантів, піонів та каонів на протонах [1, 39]**

На рис. 11 наведені резонансні залежності розсіяння гамма-квантів, піонів та каонів на протонах [1,39]. Чітко виражені піки при енергіях близько 270–280 МеВ (в лабораторній системі відліку) пов'язані з протонними термокомплексами на основі вихор-хвильових мас, близьких до мас каонів: $mc^2 \approx 500$ МеВ. В такому випадку зі співвідношень (4–16) отримуємо: $T \approx 8,6 \cdot 10^{11}$ °К, $\upsilon / c \approx 0,75$, $Mc^2 \approx 270$ МеВ, $h\nu_{he} \approx 280$ МеВ. Останні дві величини й визначають резонансний характер розсіяння. Цікаво, що для додатних каонів (рис. 11 г), на відміну від від'ємних (рис. 11 в), спостерігається унікальний антирезонанс, виражений у подавленні непружного розсіяння. Це безпосередньо пов'язано з вказаною вище близкістю $mc^2$ до енергії спокою каонів.

**Гігантський ядерний резонанс**

Цей резонанс зазвичай називають дипольним, пов'язуючи його з колективними коливаннями протонів ядерної речовини відносно нейтронів [1, 2, 40]. В нашій інтерпретації такого роду резонанс відноситься до хітонних частот згідно з (9). Розберемо цей механізм на прикладі ядра урану розміром $r \approx 7 \cdot 10^{-15}$ м [2] та масою $M \approx 238$ а.о.м. За таких умов густина ядерної речовини становить $\rho \approx 2,8 \cdot 10^{17}$ кг/м$^3$. Тоді на основі (3–16) маємо: $T \approx 6,6 \cdot 10^{10}$ °К, $\upsilon / c \approx 0,03$, $m \approx 4,2$ а.о.м. При збудженні ядра урану гамма-квантами (або ж при випромінюванні гамма-квантів збудженими ядрами) вихор-хвильова маса *m* ядерного термокомплексу суттєво змінюється, наближаючись до маси нуклону: $m \approx 1$ а.о.м. Тоді на основі тих самих співвідношень матимемо: $T \approx 2,8 \cdot 10^{11}$ °К, $\upsilon / c \approx 0,13$, $h\nu_{he} \approx 15$ МеВ. Останнє значення, власне, й визначає типову енергію гігантського ядерного резонансу.

**Тріонний механізм радіоактивності ядер**

Як відмічено вище, для нестабільних ядер типу ядра урану значення вихор-хвильової маси *m* термокомплексу не кратне масі нуклону. Навпаки, відносно стабільні ядра характеризуються значеннями $m \approx 4$ а.о.м., $m \approx 3$ а.о.м., $m \approx 2$ а.о.м., $m \approx 1$ а.о.м. – відносно стабільні ядра свинцю, стронцію, магнію та гелію. Тут у розрахунках використані значення густини ядерної речовини $\rho \approx 2,8 \cdot 10^{17}$ кг/м$^3$ для середніх та важких ядер, а також $\rho \approx 2,0 \cdot 10^{17}$ кг/м$^3$ для ядра гелію [2].

**Ефект Комптона та радіус електрона**

Ілюзорна точковість електрона є найбільш принциповою і грубою помилкою квантової електродинаміки [1, 2]. В ефекті Комптона чітко проявлений просторовий розмір електрона при його взаємодії з фотоном: $r_c \approx 3,86 \cdot 10^{-13}$ м [1–3]. В цьому випадку маємо справу з чітким резонансом швидкостей хітонних збуджень та електромагнітних хвиль: $\upsilon / c = 1$. В процесі комптонівського розсіяння електрон цілком проявляє свої вихор-хвильові властивості: $mc^2 \approx 0,511$ МеВ. Тоді з (7) слідує значення $Mc^2 \approx 0,206$ МеВ. Температура електрона тут становить $T \approx 1,2 \cdot 10^9$ °К, а його густина згідно з (12): $\rho_e \approx 4,79 \cdot 10^6$ кг/м$^3$. Зберігаючи це значення густини для електрона в стані спокою, за умови $Mc^2 \approx 0,511$ МеВ отримаємо радіус електрона у цьому стані: $r_e \approx 3,57 \cdot 10^{-13}$ м за температури $T_e \approx 1,3 \cdot 10^9$ °К та при $\upsilon / c \approx 0,66$. Це значення, відмінне від комптонівського радіусу електрона, найкраще узгоджується з розглянутою раніше моделлю псевдоелементарних частинок у вигляді особливостей сильного та слабкого полів (т.з. магнітних зарядів) [4]. Для протона відповідні взаємоузгодження дають значення $r_p \approx 7,9 \cdot 10^{-16}$ м, що значно нижче відомих значень в діапазоні $(8,4-9,0) \cdot 10^{-16}$ м, отриманих в експериментах останніх років [38]. Як вже зазначалось, у якості компромісу тут використаний середньоквадратичний зарядовий радіус протона $r_p \approx 8,14 \cdot 10^{-16}$ м, отриманий в ранніх експериментах з цього приводу [1, 2, 38].

**Анігіляція електрон-позитронних пар**

В процесі анігіляції енергія хітонних квантів зрівнюється з енергією спокою електрона: $h\nu_{he} \approx 0,511$ МеВ. Тоді при $\rho_e \approx 4,79 \cdot 10^6$ кг/м$^3$ з (20) отримуємо наступне значення температури електрона: $T \approx 1,44 \cdot 10^9$ °К. В такому випадку $mc^2 \approx 0,75$ МеВ, $Mc^2 \approx 0,36$ МеВ, $\upsilon / c \approx 0,83$.

**Результати експериментів на електрон-позитронних та адронних колайдерах**

Хибна інтерпретація результатів багатолітніх експериментів, виконаних на найвищому технічному рівні на електрон-позитронних та адронних колайдерах, призвела до штучного вживлення ілюзорних моделей фундаментальних взаємодій [1, 2, 5, 6]. Критично розберемо тут деякі (найбільш знакові) з цих результатів. На рис. 12 наведені енергетичні залежності перерізів розсіяння електронів на позитронах у

зустрічних пучках (система центру мас співпадає з лабораторною системою відліку) [39]. Явно виражений пік при енергії $\approx 0,77$ ГеВ поблизу $\omega$-резонансу безпосередньо стосується хітонного випромінювання сильного поля. При $\rho_e \approx 4,79 \cdot 10^6$ кг/м$^3$ з (20) отримуємо значення температури збуджених електронів та позитронів: $T \approx 1,66 \cdot 10^{10}$ °К. В такому випадку з (10, 15) слідує: $mc^2 \approx 66$ кеВ, $\upsilon / c \approx 108$. Для іншого хітонного піку на енергіях $z^0$-резонансів $\approx 91$ ГеВ аналогічні підрахунки приводять до значень $mc^2 \approx 0,55$ кеВ, $\upsilon / c \approx 1,3 \cdot 10^4$. Ці дані свідчать про суттєву турбулізацію електрон-позитронного поля при зіткненнях, за якої домінують два види вихор-хвильових структур: відносно крупномасштабні ($h\nu_{he} \approx 0,77$ ГеВ) та дрібномасштабні ($h\nu_{he} \approx 91$ ГеВ). Інші енергетичні піки на рис. 12 слід вважати наведеними в процесі релаксаційного оберненого енергетичного каскаду, характерного для сильного і слабкого полів [4].

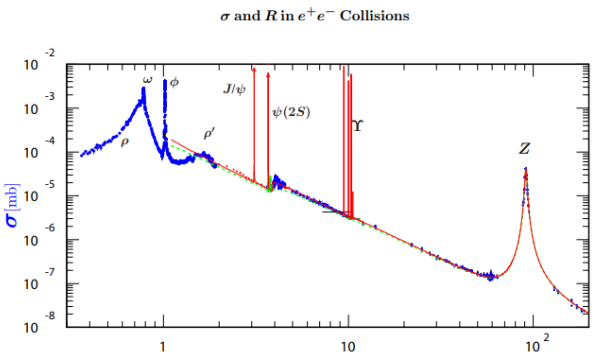



**Рис. 12. Спектри розсіяння електронів на позитронах у зустрічних пучках [39]**

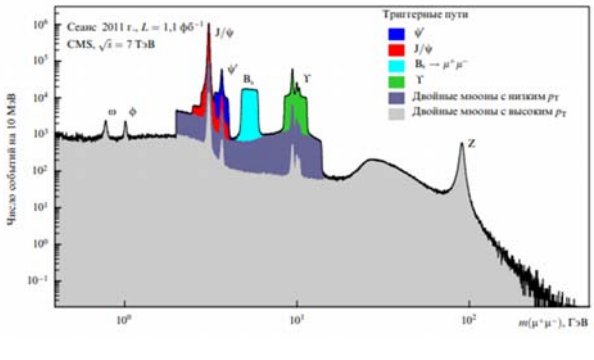



**Рис. 13. Спектри інваріантних мас подвійних мюонів, отримані в експериментах на Великому адронному колайдері [6]**

Для порівняння на рис. 13 показаний спектр інваріантних мас подвійних мюонів, отриманий у відомих експериментах на Великому адронному колайдері [6]. Ніяк не відмічений шукачами бозону Хіггса [1, 2, 5, 6], розмитий пік при енергіях $\approx 29$ ГеВ тут відповідає крупномасштабним турбулентним структурам хітонного поля протонів. При $\rho_p \approx 7,4 \cdot 10^{17}$ кг/м$^3$ згідно з (20) ця енергія співвідноситься з температурою $T \approx 4,1 \cdot 10^{12}$ °К, за якої з (13) слідує значення $mc^2 \approx 106$ МеВ, практично рівне енергії спокою мюонів. Вони утворюють вихор-хвильову основу тріонів при зіткненнях. Відношення $\upsilon / c$ тут становить $\approx 17$. Для дрібномасштабних структур при $h\nu_{he} \approx 91$ ГеВ (енергії $z^0$-резонансів) відповідні розрахунки приводять до значень: $mc^2 \approx 34$ МеВ, $\upsilon / c \approx 52$.

Наведені тут результати свідчать про цілковиту неадекватність існуючих кваркових моделей адронів, квантової хромодинаміки як науки та сучасної стандартної моделі фундаментальних взаємодій.

**Макротріони в космічних системах та проблема прихованої маси й темної енергії**

Застосування поняття температури до розрахунків зоряної динаміки космічних систем [1] неявно ставить питання щодо макрокосмічного аналога сталої Больцмана *k*. Зазвичай воно обходиться через поняття «енергетичної температури» в розподілі Максвелла–Больцмана, значення якої співставляються з середньоквадратичною швидкістю та масою елементів системи [1]. В цьому контексті виникає дещо несподіване в рамках існуючих фізичних концепцій запитання відносно правомірності застосування корпускулярно-хвильового дуалізму в макросистемах. На масштабах, що значно перевищують атомні, відповідь на нього традиційно негативна [2]. Однак, розглянута вище концепція тріонів прямо суперечить такому підходу. Більше того, дуалізму тут явно не вистачає – мову слід вести про корпускулярно-вихор-хвильовий тріалізм, включаючи сюди й рівноправну вихрову компоненту, проігнорована досі фізикою.

Між тим, пряме застосування співвідношень (1–25) до систем галактичних та метагалактичних масштабів впирається саме в константи Больцмана, Планка та Віна, неспівставні з такими масштабами. Ці труднощі принаймні формально обходяться замінами:

$$h \to H,\ k \to K,\ b \to B,\ \lambda \to \Lambda, \qquad (26–29)$$

де $H$, $K$, $B$, $\Lambda$ – макроаналоги відповідних констант та макроскопічна довжина хвилі структури. Тоді з (1–29) слідує:

$$H = \Lambda \upsilon m,\ B = \frac{cH}{4,965K},\ H\nu_{he} = m\upsilon^2 \qquad (30–32)$$

Неформальний характер замін (26–29) може бути пов'язаний з топологічними аналогіями електромагнітного та гравітаційного полів [4]. Між тим, як вже відзначалось [4], вільні форми вихор-

хвильового гравітаційного поля характеризуються суто уявною фазовою швидкістю, що унеможливлює поширення гравітонів (аналога фотонів) або ж робить їх віртуальними. В такому контексті, зокрема, стала *B* у (31) стосується уявного гравітаційного рівноважного теплового випромінювання. Врешті проблема віртуальності такого випромінювання знімається, якщо вважати, що воно поширюється не у вакуумі, а в космічному середовищі.

Співвідношення (26–32) дозволяють оцінити вихор-хвильову масу $m$ макротріонів за відомою приєднаною масою *M* та швидкостями $\upsilon$ зоряних та галактичних скупчень. Або ж, навпаки, за відомою масою $m$ та характерними швидкостями $\upsilon$ знайти приєднану масу *M*. Зокрема для квазара Sgr-A* в центрі Галактики при $m \approx 4{,}31 \cdot 10^6 M_s$ [41] та при $\upsilon \approx 260$ км/с (екстремум швидкостей зір на відстані $r \approx 500$ пк від центру Галактики [41]) маємо:

$$M = \frac{2}{4{,}965}\frac{c}{\upsilon} m \approx 2{,}0 \cdot 10^9 \ M_s , \tag{33}$$

де $M_s$ – маса Сонця. В такому випадку середня густина приєднаної до *m* зоряної речовини в об'ємі галактичного балджу вказаного радіусу становить $\approx 4 M_s / \text{пк}^3$. Для кульових зоряних скупчень при $\upsilon \approx 100 - 200$ км/с [1], відповідно, маємо: $m / M \sim 1 \cdot 10^{-3}$. Для галактичних скупчень при $\upsilon \approx (1-2) \cdot 10^3$ км/с [1] слідує оцінка: $m / M \sim 1 \cdot 10^{-2}$.

У випадку галактичного гало при $\upsilon \approx 50 - 100$ км/с (кульові зоряні скупчення гало), приймаючи масу (33) балджу Галактики за вихор-хвильову масу $m'$ гало, отримаємо значення приєднаної до $m'$ маси гало:

$$M' = \frac{2}{4{,}965}\frac{c}{\upsilon} m' \approx 3 \cdot 10^{12} M_s \tag{34}$$

Ця «прихована» маса Галактики ніяк не враховується одіозною теоремою віріала [1].

**Енергетичні каскади в системах тріонів**

Обернений енергетичний каскад в макросистемах відображає процес релаксації хітонного поля до стану термодинамічної рівноваги з самим собою (в корпускулярному аспекті) при $\upsilon \to 0$. Наявність інших станів рівноваги при $\upsilon \le c$ обумовлює утворення квазістабільних форм матерії – електронів, протонів та ядер.

Нелінійність такого роду систем виключає застосування тут звичного для квантової фізики принципу суперпозиції. Це висуває на перший план топологічний аспект утворення структур сильного, слабкого та гідродинамічного полів [4].

Протилежний до оберненого прямий енергетичний каскад безпосередньо представлений колапсом тріонів. Крім розглянутих вже мікроколапсів (як генераторів космічних променів) відмітимо також макроколапси, де в якості вихор-хвильової маси *m* виступає маса зорі, навколо якої концентрується приєднана маса *M* сильного та слабкого полів. Постколапсний етап, що зазвичай сприймається як вибух т.з. нової (наднової) зорі [1, 42], формує нову космічну систему .

Домінуюча роль сильного і слабкого (а не гравітаційного) полів в механізмах макроколапсу виявляє всю безнадійність описання такого роду процесів на основі традиційних уявлень про суто гравітаційний колапс в космічних системах [1, 42]. Настільки ж безуспішними є багатолітні намагання описати спіральні візерунки на дисках галактик (топологічні структури сильного поля ) через гравітаційні хвилі густини [1].

**Тріони в біологічних системах**

Життєдіяльність організму людини зазвичай описується в суто електрохімічному аспекті через структури електромагнітного поля. Відносно слабкі магнітні поля біологічних об'єктів в цілому наслідують динаміку руху електричних зарядів та відповідні ритми (мозку, серця та ін.) [1, 43]. Однак, як вже зазначалось, рух еритроцитів капілярами крові не вписується в таку схему: вони являють собою тріони на основі іонів заліза. Частота хітонного випромінювання цих термокомплексів становить $\approx 81$ Гц. Колапс такого роду біотріонів супроводжується відчуттям мікроопіку, пошкодженням капіляру та мікрогематомою.

Цей приклад свідчить про те, що біополе людини, крім явно вираженої електромагнітної компоненти, повинно включати також хітонні компоненти сильного та слабкого полів. Нинішня ситуація в біофізиці нагадує геофізичну та астрофізичну, де цілком ігноруються структури цих полів на користь явно виражених проявів гравітаційного поля. Комплексне вивчення фундаментальних фізичних полів дозволить подолати фрагментарність наших знань про природу.

**Література**

1. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А.М. Прохорова. – М. : Большая росс. энц., 1999. – 760 с.

2. Физика микромира. Маленькая энциклопедия / под ред. Д.В. Ширкова. – М. : Сов. энц., 1980. – 528 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3 / Савельев И.В. – М. : Наука, 1979. – 304 с.

4. Заспа Ю.П. Кооперативна динаміка, взаємоіндукція, комплексна топологія та гіперкомплексна хронологія вихор-хвильових форм електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабкого, а також гідродинамічного полів проти хибних стандартів SM та $\Lambda CDM$ / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1 (269). – С. 254–266.

5. Казаков Д.И. Хиггсовский бозон открыт: что дальше? / Д.И. Казаков // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 1004–1016.

6. Ланев А.В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики / А.В. Ланев // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 996–1004.

7. Заспа Ю.П. Ядерний та гідродинамічний бафтинг, флаттер та колапс в гетерогенних системах: псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка і топологія Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 2 (271). – С. 238–248.

8. Beck R. Magnetic Fields in Spiral Galaxies / R. Beck // Astron. Astrophys. Rev. – 2016. – V. 24, № 4. – P. 1–57.

9. Бескин В.С. Радиопульсары – поиски истины / В.С. Бескин, Я.Н. Истомин, А.А. Филиппов // УФН. – 2013. – Т. 183, № 2. – С. 179–194.

10. Бескин В.С. Магнитогидродинамические модели астрофизических струйных выбросов / В.С. Бескин // УФН. – 2010. – 2010. – Т. 180, № 12. – С. 1241–1278.

11. Nakajima Y. “Carbon in the Core” Revisited / Y. Nakajima, E. Takahashi, T. Suzuki, K. Funakoshi // Phys. Of the Earth and Planetary Interiors. – 2009. – V. 174. – P. 202–211.

12. Zhang Y. Carbon and Other Light Element Contents in the Earth`s Core Based on First-principles Molecular Dynamics / Y. Zhang, Q. Yin // PNAS. – 2012. – V. 109, N 48. – P. 19579–19583.

13. Chen B. et al. Hidden Carbon in Earth`s inner Core Revealed by Shear Softening in Dense $Fe_7C_3$. URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1411154111

14. Молодец А.М. Термодинамические потенциалы углерода / А.М. Молодец, М.А. Молодец, С.С. Набатов // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, № 2. – С. 88–93.

15. Wang T. Equatorial Anisotropy in the Inner part of Earth`s Inner Core From Autocorrelation of Earthquake Coda / T. Wang, X. Song, H.H. Xia // Nature Geoscience. – 2015. – V. 8. – P. 224–227.

16. Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли / В.В. Кузнецов // УФН. – 1997. – Т. 167, № 9. – С. 1001–1012.

17. Заспа Ю.П. Кооперативна контактна динаміка хвильових структур в гіперкомплексному спіральному часі та в комплексному Евклідовому просторі як основа геодинаміки та хвильових змін клімату Землі. Фактичний спад глобального потепління та перспектива нового льодовикового періоду / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5 (265). – С. 290–301.

18. Кузьмин М. Глубинная геодинамика – основной механизм развития Земли / М. Кузьмин, В. Ярмолюк, В. Кравчинский // Наука в России. – 2013. – № 6. – С. 10–19.

19. Ковтун А.А. Электропроводность Земли / А.А. Ковтун // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 10. – С. 111–117.

20. Железомарганцевые конкреции [Электронный ресурс] .– Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Железомарганцевые_конкреции

21. Викулин А.В. О геодинамическом детекторе гравитационных волн / А.В. Викулин // Пространство и время. – 2014. – № 1 (15). – С. 196–207.

22. Викулин А.В. О волновых и реидных свойствах земной коры / А.В. Викулин, Х.Ф. Махмудов, А.Г. Иванчин и др. // ФТТ. – 2016. – Т. 58, № 3. – С. 547–556.

23. Spectrum of the Cosmic Rays (Courtesy of PDG, from T. Gaisser and T. Stanev). URL: https://www.researchgate.net/figure/Spectrum-of-the-Cosmic-Rays-courtesy-of-PDG-from-TGaisser-and-TStanev_fig1_23678571

24. Космические лучи [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.astronet.ru/db/msg/1188363

25. The Solar Interior. Marshall Space Flight Center. URL: https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml

26. Kimura H. Brightness of the Solar F-corona / H. Kimura, I. Mann // Earth Planets Space. – 1998. – V. 50. – P. 493–499.

27. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної і метагалактичної енергії. Частина ІІІ / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 3 (237). – С. 92–100.

28. Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей (история и общий обзор) / В.Л. Гинзбург // УФН. – 2001. – Т. 171, № 10. – С. 1109–1121.

29. Ткачев И.И. Наблюдение эффекта Грейзена–Зацепина–Кузьмина обсерваторией Telescope Array / И.И. Ткачев // УФН. – 2011. – Т. 181, № 9. – С. 990–997.

30. Птускин В.С. Происхождение космических лучей / В.С. Птускин // УФН. – 2010. – Т. 180, № 9. – С. 1000–1004.

31. Троицкий С.В. Космические частицы с энергиями выше $10^{19}$ эВ: краткий обзор результатов / С.В. Троицкий // УФН. – 2013. – Т. 183, № 3. – С. 323–330.

32. Смут Дж.Ф. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное знание / Дж.Ф. Смут // УФН. – 2007. – Т. 177, № 12. – С. 1294–1317.

33. Мирнов С.В. Токамаки: триумф или поражение? / С.В. Мирнов // Природа. – 1999. – № 12. – С. 26–37.

34. Клюкач А.А. Влияние асимметрии спиральной камеры на вибрации гидроагрегата [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.plotina.net/experts/klukach

35. Сачин В.М. Комплексная фрактодиагностика флаттера рабочего колеса вентилятора / В.М. Сачин, Н.В. Туманов, М.А. Лаврентьева, С.А. Черкасова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического ун-та. – 2011. – № 3(27). – С. 185–194.

36. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної і метагалактичної енергії та електромагнетизму. Частина VII / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 212–221.

37. Probing the Proton: Electron – Proton Scattering. URL: https://www2.ph.ed.ac.uk/~vjm/Lectures/.../PPNotes3.pdf

38. Чурочкина С.В. Проблема зарядового радиуса протона. Обзор / С.В. Чурочкина, А.А. Удалова // Вопросы прикладной физики. – 2016. – № 23. – С. 3–16.

39. Review of Particle physics. Particle Data Group. URL: http://pdg.lbl.gov

40. Мазур В.М. Гигантский дипольный резонанс в поглощении и эмиссии $\gamma$-квантов средними и тяжелыми ядрами / В.М. Мазур, Л.М. Мельникова // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2006. – Т. 37, № 6. – С. 1744–1775.

41. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарного, сонячного, галактичного і метагалактичного магнетизму. Частина II / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 2 (235). – С. 36–52.

42. Ряжская О.Г. Нейтрино от гравитационных коллапсов звезд: современный статус эксперимента / О.Г. Ряжская // УФН. – 2006. – Т. 176, № 10. – С. 1039–1050.

43. Холодов Ю.А. Магнитные поля биологических объектов / Холодов Ю.А., Козлов А.Н., Горбач А.М. – М. : Наука, 1987. – 144 с.

**References**

1. Fizicheskaya enciklopediya : v 5 t. / pod red. A.M. Prohorova. – M. : Bolshaya ross. enc., 1999. – 760 s.

2. Fizika mikromira. Malenkaya enciklopediya / pod red. D.V. Shirkova. – M. : Sov. enc., 1980. – 528 s.

3. Savelev I.V. Kurs obshej fiziki. T. 3 / Savelev I.V. – M. : Nauka, 1979. – 304 s.

4. Zaspa Yu.P. Kooperatyvna dynamika, vzaiemoinduktsiia, kompleksna topolohiia ta hiperkompleksna khronolohiia vykhor-khvylovykh form elektromahnitnoho, hravitatsiinoho, sylnoho i slabkoho, a takozh hidrodynamichnoho poliv proty khybnykh standartiv SM ta / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2019. – № 1 (269). – S. 254–266.

5. Kazakov D.I. Higgsovskij bozon otkryt: chto dalshe? / D.I. Kazakov // UFN. – 2014. – T. 184, № 9. – S. 1004–1016.

6. Lanev A.V. Rezultaty kollaboracii CMS: bozon Higgsa i poiski novoj fiziki / A.V. Lanev // UFN. – 2014. – T. 184, № 9. – S. 996–1004.

7. Zaspa Yu.P. Yadernyi ta hidrodynamichnyi baftynh, flatter ta kolaps v heterohennykh systemakh: psevdokooperatyvna vykhor-khvylova dynamika i topolohiia Chornobylskoi ta Saiano-Shushenskoi katastrof / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2019. – № 2 (271). – S. 238–248.

8. Beck R. Magnetic Fields in Spiral Galaxies / R. Beck // Astron. Astrophys. Rev. – 2016. – V. 24, № 4. – R. 1–57.

9. Beskin V.S. Radiopulsary – poiski istiny / V.S. Beskin, Ya.N. Istomin, A.A. Filippov // UFN. – 2013. – T. 183, № 2. – S. 179–194.

10. Beskin V.S. Magnitogidrodinamicheskie modeli astrofizicheskih strujnyh vybrosov / V.S. Beskin // UFN. – 2010. – 2010. – T. 180, № 12. – S. 1241–1278.

11. Nakajima Y. “Carbon in the Core” Revisited / Y. Nakajima, E. Takahashi, T. Suzuki, K. Funakoshi // Phys. Of the Earth and Planetary Interiors. – 2009. – V. 174. – P. 202–211.

12. Zhang Y. Carbon and Other Light Element Contents in the Earth`s Core Based on First-principles Molecular Dynamics / Y. Zhang, Q. Yin // PNAS. – 2012. – V. 109, N 48. – P. 19579–19583.

13. Chen B. et al. Hidden Carbon in Earth`s inner Core Revealed by Shear Softening in Dense Fe7C3. URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1411154111

14. Molodec A.M. Termodinamicheskie potencialy ugleroda / A.M. Molodec, M.A. Molodec, S.S. Nabatov // Fizika goreniya i vzryva. – 2000. – T. 36, № 2. – S. 88–93.

15. Wang T. Equatorial Anisotropy in the Inner part of Earth`s Inner Core From Autocorrelation of Earthquake Coda / T. Wang, X. Song, H.H. Xia // Nature Geoscience. – 2015. – V. 8. – P. 224–227.

16. Kuznecov V.V. Anizotropiya svojstv vnutrennego yadra Zemli / V.V. Kuznecov // UFN. – 1997. – T. 167, № 9. – S. 1001–1012.

17. Zaspa Yu.P. Kooperatyvna kontaktna dynamika khvylovykh struktur v hiperkompleksnomu spiralnomu chasi ta v kompleksnomu Evklidovomu prostori yak osnova heodynamiky ta khvylovykh zmin klimatu Zemli. Faktychnyi spad hlobalnoho poteplinnia ta perspektyva novoho lodovykovoho periodu / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2018. – № 5 (265). – S. 290–301.

18. Kuzmin M. Glubinnaya geodinamika – osnovnoj mehanizm razvitiya Zemli / M. Kuzmin, V. Yarmolyuk, V. Kravchinskij // Nauka v Rossii. – 2013. – № 6. – S. 10–19.

19. Kovtun A.A. Elektroprovodnost Zemli / A.A. Kovtun // Sorosovskij obrazovatelnyj zhurnal. – 1997. – № 10. – S. 111–117.

20. Zhelezomargancevye konkrecii [Elektronnyj resurs] .– Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/Zhelezomargancevye_konkrecii

21. Vikulin A.V. O geodinamicheskom detektore gravitacionnyh voln / A.V. Vikulin // Prostranstvo i vremya. – 2014. – № 1 (15). – S. 196–207.

22. Vikulin A.V. O volnovyh i reidnyh svojstvah zemnoj kory / A.V. Vikulin, H.F. Mahmudov, A.G. Ivanchin i dr. // FTT. – 2016. – T. 58, № 3. – S. 547–556.

23. Spectrum of the Cosmic Rays (Courtesy of PDG, from T. Gaisser and T. Stanev). URL: https://www.researchgate.net/figure/Spectrum-of-the-Cosmic-Rays-courtesy-of-PDG-from-TGaisser-and-TStanev_fig1_23678571
24. Kosmicheskie luchi [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.astronet.ru/db/msg/1188363
25. The Solar Interior. Marshall Space Flight Center. URL: https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml
26. Kimura H. Brightness of the Solar F-corona / H. Kimura, I. Mann // Earth Planets Space. – 1998. – V. 50. – P. 493–499.
27. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoi, soniachnoi, halaktychnoi i metahalaktychnoi enerhii. Chastyna III / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016. – № 3 (237). – S. 92–100.
28. Ginzburg V.L. Astrofizika kosmicheskih luchej (istoriya i obshij obzor) / V.L. Ginzburg // UFN. – 2001. – T. 171, № 10. – S. 1109–1121.
29. Tkachev I.I. Nablyudenie effekta Grejzena–Zacepina–Kuzmina observatoriej Telescope Array / I.I. Tkachev // UFN. – 2011. – T. 181, № 9. – S. 990–997.
30. Ptuskin V.S. Proishozhdenie kosmicheskih luchej / V.S. Ptuskin // UFN. – 2010. – T. 180, № 9. – S. 1000–1004.
31. Troickij S.V. Kosmicheskie chasticy s energiyami vyshe 1019 eV: kratkij obzor rezultatov / S.V. Troickij // UFN. – 2013. – T. 183, № 3. – S. 323–330.
32. Smut Dzh.F. Anizotropiya reliktovogo izlucheniya: otkrytie i nauchnoe znanie / Dzh.F. Smut // UFN. – 2007. – T. 177, № 12. – S. 1294–1317.
33. Mirnov S.V. Tokamaki: triumf ili porazhenie? / S.V. Mirnov // Priroda. – 1999. – № 12. – S. 26–37.
34. Klyukach A.A. Vliyanie asimmetrii spiralnoj kamery na vibracii gidroagregata [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://www.plotina.net/experts/klukach
35. Sachin V.M. Kompleksnaya fraktodiagnostika flattera rabochego kolesa ventilyatora / V.M. Sachin, N.V. Tumanov, M.A. Lavrenteva, S.A. Cherkasova // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo un-ta. – 2011. – № 3(27). – S. 185–194.
36. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoi, soniachnoi, halaktychnoi i metahalaktychnoi enerhii ta elektromahnetyzmu. Chastyna VII / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2017. – № 3. – S. 212–221.
37. Probing the Proton: Electron – Proton Scattering. URL: https://www2.ph.ed.ac.uk/~vjm/Lectures/.../PPNotes3.pdf
38. Churochkina S.V. Problema zaryadovogo radiusa protona. Obzor / S.V. Churochkina, A.A. Udalova // Voprosy prikladnoj fiziki. – 2016. – № 23. – S. 3–16.
39. Review of Particle physics. Particle Data Group. URL: http://pdg.lbl.gov
40. Mazur V.M. Gigantskij dipolnyj rezonans v pogloshenii i emissii -kvantov srednimi i tyazhelymi yadrami / V.M. Mazur, L.M. Melnikova // Fizika elementarnyh chastic i atomnogo yadra. – 2006. – T. 37, № 6. – S. 1744–1775.
41. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoho, soniachnoho, halaktychnoho i metahalaktychnoho mahnetyzmu. Chastyna II / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016. – № 2 (235). – S. 36–52.
42. Ryazhskaya O.G. Nejtrino ot gravitacionnyh kollapsov zvezd: sovremennyj status eksperimenta / O.G. Ryazhskaya // UFN. – 2006. – T. 176, № 10. – S. 1039–1050.
43. Holodov Yu.A. Magnitnye polya biologicheskih obektov / Holodov Yu.A., Kozlov A.N., Gorbach A.M. – M. : Nauka, 1987. – 144 s.

Рецензія/Peer review : 23.6.2019 р. Надрукована/Printed :18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

## Повні вимоги до оформлення рукопису http://vestnik.ho.com.ua/rules/

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 12 від 26.06.2019 р.**

Підп. до друку 28.06.2019 р. Ум.друк.арк. 27,50 Обл.-вид.арк. 26,16
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63